



原子炉圧力容器の中性子照射脆化 予測法検討小委員会

(Subcommittee on Validation of
Irradiation Embrittlement Trend Curve
for Reactor Pressure Vessel Steels)

最終報告書

2021年 12月

一般社団法人 日本溶接協会
原子力研究委員会
I E T 小委員会

目 次

1.はじめに	1
2.活動計画	2
3.活動実績	2
4.活動成果	4
4. 1 現行の照射脆化管理及び脆化予測法の概要	4
4. 1. 1 現行の照射脆化管理の概要	4
4. 1. 2 JEAC4201-2007[2013年追補版]の脆化予測法の概要.....	14
4. 2 照射脆化に関する最新知見の調査	24
4. 2. 1 国内の原子炉圧力容器鋼材の溶質原子クラスターの分析状況(電中研における研究)	24
4. 2. 2 照射脆化メカニズムに関する研究動向	30
4. 2. 3 国外の脆化予測法の国内鋼材への適用性の調査.....	53
4. 2. 4 国内照射データの統計解析に関する研究	59
4. 3 脆化予測法改定案の概要	66
4. 3. 1 現行予測法の基本モデル式の見直しに向けた検討項目	66
4. 3. 2 脆化予測法改定案の基本モデル式の開発方針.....	72
4. 3. 3 ミクロ組織変化予測式改定案.....	77
4. 3. 4 遷移温度移行量予測式改定案.....	91
4. 3. 5 脆化予測法改定案の基本モデル式における係数最適化及び予測性能の評価...	93
4. 3. 6 脆化予測法改定案における ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方	101
4. 4 脆化予測法改定案に対する技術的知見等に基づくレビュー	112
4. 4. 1 ミクロ組織変化予測式改定案に関する議論	112
4. 4. 2 遷移温度移行量予測式改定案に関する議論	120
4. 4. 3 改定案の係数最適化におけるプロセスの適切性に関する議論	129
4. 4. 4 改定案における ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方に関する議論 ...	141
4. 5 技術的知見等に基づくレビューを踏まえた意見	142
4. 6 レビューを踏まえた照射脆化メカニズムに関する今後の研究課題	150
5.まとめ	154
6.参考文献	155

付録 1 委員名簿

付録 2 第1回～8回小委員会議事概要

付録 3 脆化予測法の基本モデル式改定案

付録 4 微分方程式形式のミクロ組織変化予測式による遷移温度移行量の予測結果

付録 5 脆化予測法の基本モデル式改定案に対する各委員の意見

付録 6 各委員の意見に対する回答

表 目 次

表 3-1 IET 小委員会開催実績.....	3
表 4.5-1 委員に提示した質問項目	142
表 4.5-2 質問項目 No.1~7 に対する専門家委員の意見の概要と今後の対応	147
表 4.6-1 照射欠陥の形成に関する研究課題に該当する専門家委員の意見	151
表 4.6-2 照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与の解明に関する専門家委員の意見	152

図 目 次

図 4.1.1-1 原子炉圧力容器鋼の中性子照射による破壊靱性の低下	6
図 4.1.1-2 原子炉圧力容器における照射脆化への対応	7
図 4.1.1-3 監視試験カプセルの概要(PWR プラントの例)	7
図 4.1.1-4 原子炉圧力容器内における監視試験カプセルの装荷位置	8
図 4.1.1-5 監視試験カプセル装荷位置と原子炉圧力容器における照射量の関係 (PWR プラントの例)	8
図 4.1.1-6 監視試験におけるシャルビ一衝撃試験及び測定指標	9
図 4.1.1-7 監視試験と原子炉圧力容器における各種評価の関係	9
図 4.1.1-8 通常運転時における圧力・温度制限の概要	10
図 4.1.1-9 圧力・温度制限曲線の設定に際しての評価の流れ	10
図 4.1.1-10 事故時の原子炉圧力容器の健全性評価(PTS 評価)の概要 (JEAC4206-2007)	11
図 4.1.1-11 事故時の温度・圧力過渡を踏まえた PTS 状態遷移曲線の設定 (JEAC4206-2007)	11
図 4.1.1-12 照射脆化を考慮した破壊靱性遷移曲線の設定(JEAC4206-2007)	12
図 4.1.1-13 PTS 評価における原子炉圧力容器の健全性の判定基準 (JEAC4206-2007)	12
図 4.1.1-14 PTS 評価に際して考慮される主な保守性(JEAC4206-2007)	13
図 4.1.1-15 JEAC4216 に基づくマスターカーブ法による破壊靱性評価の概要	13
図 4.1.2-1 JEAC4201 に規定された脆化予測法の変遷	16
図 4.1.2-2 2007 年版の脆化予測法における照射脆化メカニズムの考え方	16
図 4.1.2-3(1/2) 溶質原子クラスターに関する式(溶質原子クラスター数密度)	17
図 4.1.2-3(2/2) 溶質原子クラスターに関する式(溶質原子クラスタ一体積率)	17
図 4.1.2-4 溶質原子クラスタ一体積率の平方根と遷移温度移行量の相関	18
図 4.1.2-5 マトリックス損傷の数密度の式	18
図 4.1.2-6 マトリックス損傷による遷移温度移行量の式	19
図 4.1.2-7 照射速度(中性子束)の寄与の考え方	19
図 4.1.2-8 照射温度の寄与の考え方	19
図 4.1.2-9 マトリックス Cu 濃度の寄与の考え方	20
図 4.1.2-10 2007 年版の脆化予測法の基本モデル式	20
図 4.1.2-11 現行予測法の策定に際して新たに考慮された監視試験データ	21

図 4.1.2-12	溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関 (監視試験片の分析結果)	21
図 4.1.2-13(1/2)	現行予測法における 2007 年版の脆化予測法からの変更点(1/2)	22
図 4.1.2-13(2/2)	現行予測法における 2007 年版の脆化予測法からの変更点(2/2)	22
図 4.1.2-14	JEAC4201 次回改定版の技術評価の際の確認項目	23
図 4.1.2-15	電気協会に対する NRA の発出文書と電気協会の回答	23
図 4.2.1-1	電中研に導入された APT 分析装置	25
図 4.2.1-2	APT の測定原理	26
図 4.2.1-3	APT 分析に際して電中研で留意されている事項	26
図 4.2.1-4	溶質原子クラスター直径の照射量依存性(PWR 照射条件)	27
図 4.2.1-5	溶質原子クラスター直径の中性子束依存性	27
図 4.2.1-6	溶質原子クラスター数密度の照射量依存性(PWR 照射条件)	28
図 4.2.1-7	溶質原子クラスター数密度の中性子束依存性	28
図 4.2.1-8	溶質原子クラスター体積率の照射量依存性(PWR 照射条件)	29
図 4.2.1-9	溶質原子クラスター中の Cu 原子の照射量, 中性子束依存性 (PWR 及び試験炉照射条件)	29
図 4.2.2-1(1/2)	試験炉照射材によるミクロ組織分析結果の照射量依存性の例(1/2)	31
図 4.2.2-1(2/2)	試験炉照射材によるミクロ組織分析結果の照射量依存性の例(2/2)	31
図 4.2.2-2	分析対象試験片の化学組成, 照射条件及び硬さ変化	32
図 4.2.2-3	WB-STEM 法の概要	32
図 4.2.2-4	WB-STEM 法による転位ループの観察結果	33
図 4.2.2-5	転位ループによる硬さ上昇量の試算結果	33
図 4.2.2-6	溶質原子クラスターと転位ループの硬さ上昇への寄与	34
図 4.2.2-7	TEM と APT による同一領域の観察結果	34
図 4.2.2-8(1/2)	焼鈍の有無による溶質原子クラスター形成と硬化の関係(1/2)	35
図 4.2.2-8(2/2)	焼鈍の有無による溶質原子クラスター形成と硬化の関係(2/2)	35
図 4.2.2-9	プラントの高経年化に伴い顕在化する課題	37
図 4.2.2-10	高照射量領域における Mn の照射影響	37
図 4.2.2-11	照射硬化挙動に関する合金元素依存性	38
図 4.2.2-12	Fe-Mn 合金, Fe-Cu 合金及び純鉄の照射影響の違い	38
図 4.2.2-13	照射影響に関する Mn 含有量依存性	39
図 4.2.2-14	Mn の照射影響に関する現状知見	39
図 4.2.2-15	照射速度依存性に関する現状知見	40
図 4.2.2-16	高照射量領域に対応した脆化予測モデル開発の必要性	40
図 4.2.2-17	標準サイズの衝撃試験片及びサブサイズ試験片の採取位置と寸法	42
図 4.2.2-18	標準サイズの衝撃試験片及びサブサイズ試験片により得られた DBTT の相関	42
図 4.2.2-19	HAZ(1mm, 4mm 位置)における衝撃試験結果の違い(未照射材)	43
図 4.2.2-20	母材から溶接金属における照射前後の遷移温度(DBTT)の分布	43
図 4.2.2-21	サブサイズ試験片を用いた衝撃試験技術に関して得られた知見	44
図 4.2.2-22	得られた知見を踏まえた提言	44
図 4.2.2-23	JAEA における照射材の微細組織分析に関する研究の概要	46
図 4.2.2-24	APT による溶質原子クラスターの分析	46
図 4.2.2-25	溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の関係	47

図 4.2.2-26	溶質原子クラスター中の Cu 原子及び Si 原子の比率.....	47
図 4.2.2-27	溶質原子クラスター中の各原子のギニエ半径.....	48
図 4.2.2-28	オージェ電子分光分析による粒界偏析元素の分析	50
図 4.2.2-29	オージェ電子分光分析による粒界破面の偏析元素の分析方法	50
図 4.2.2-30	P の粒界偏析に関する実機照射材及び試験炉照射材の照射速度 依存性.....	51
図 4.2.2-31	既往研究も含めた粒界脆化の可能性に関する評価結果.....	51
図 4.2.2-32	照射材の微細組織分析に関する研究で得られた知見.....	52
図 4.2.3-1	国内外の脆化予測法とその変遷.....	54
図 4.2.3-2(1/2)	主要な脆化予測法において考慮されるパラメータ	54
図 4.2.3-2(2/2)	主要な脆化予測法の最適化対象データ数及び ΔT_{41J} の予測残差の 標準偏差.....	55
図 4.2.3-3	国内外の主要な脆化予測法の国内鋼材への適用性評価.....	55
図 4.2.3-4(1/2)	国内監視試験データに対する予測結果の比較	56
図 4.2.3-4(2/2)	国内試験炉照射データに対する予測結果の比較	56
図 4.2.3-5	10CFR50.61a(EONY)及び ASTM E900-15 の基本モデル式による 国内鋼材を対象とした係数最適化	57
図 4.2.3-6	10CFR50.61a(EONY)の基本モデル式の係数最適化結果	57
図 4.2.3-7	ASTM E900-15 の基本モデル式の係数最適化結果	58
図 4.2.3-8	国内全照射データに対する予測結果の比較	58
図 4.2.4-1	BNP 法の特徴	60
図 4.2.4-2(1/2)	BNP 法を適用した遷移温度移行量の計算方法(1/2)	61
図 4.2.4-2(2/2)	BNP 法を適用した遷移温度移行量の計算方法(2/2)	61
図 4.2.4-3	現行予測法の考え方と BNP 法を適用した本研究の検討内容の関係	62
図 4.2.4-4	国内全照射データを対象とした統計解析の実施内容	62
図 4.2.4-5	解析の信頼性(Gelman-Rubin 統計量)の評価方法の概要	63
図 4.2.4-6	予測性能の評価指標(WAIC)の概要	63
図 4.2.4-7	入力変数の組み合わせと WAIC の関係 (BWR 監視試験データの評価結果)	64
図 4.2.4-8	データ区分ごとの最適な入力変数の組み合わせ(暫定)	64
図 4.2.4-9	BNP 法による遷移温度移行量の計算値と実測値の関係	65
図 4.2.4-10	ニューラルネットワークの概要	65
図 4.3.1-1	現行予測法の基本モデル式に関する論点(方法論)	68
図 4.3.1-2	現行予測法の基本モデル式に関する論点(考慮する脆化機構)	68
図 4.3.1-3	照射脆化メカニズムに関する研究の分析手法に関する論点	69
図 4.3.2-1	脆化予測法改定案の開発方針	73
図 4.3.2-2	脆化予測法の開発に際しての検討項目	74
図 4.3.2-3	ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の開発の流れ	74
図 4.3.2-4	脆化予測法の開発において考慮する照射脆化メカニズム	75
図 4.3.2-5	溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関	75
図 4.3.2-6	現行予測法による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果	76
図 4.3.3-1	ミクロ組織変化予測式において考慮する照射脆化メカニズムと 個々の式の関係	79
図 4.3.3-2	現行予測法のミクロ組織変化予測式	80

図 4.3.3-3	見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式形式).....	80
図 4.3.3-4	ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の記号の説明.....	81
図 4.3.3-5	溶質原子クラスター平均体積の式の見直し方針.....	81
図 4.3.3-6	溶質原子クラスターの平均直径の照射量依存性.....	82
図 4.3.3-7	見直し後の溶質原子クラスター平均体積の式.....	82
図 4.3.3-8	見直し後の式による溶質原子クラスター平均体積の予測結果.....	83
図 4.3.3-9	溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度の式の見直し方針.....	83
図 4.3.3-10	溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度の式の見直し結果.....	84
図 4.3.3-11	照射促進クラスター数密度の Si 含有量に対する依存性の分析結果.....	84
図 4.3.3-12	マトリックス Cu 濃度の式の見直し方針.....	85
図 4.3.3-13	溶質原子クラスター当たりの平均原子数の照射量に伴う変化.....	85
図 4.3.3-14	溶質原子クラスター当たりの平均原子数に対する照射温度 及び中性子束の影響.....	86
図 4.3.3-15	マトリックス Cu 濃度の式の見直し結果.....	86
図 4.3.3-16	見直したミクロ組織変化予測式の溶質原子クラスターに関する 各指標の実測値に対する係数最適化(妥当性の確認).....	87
図 4.3.3-17	見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式)による溶質原子クラスター に関する各指標の予測結果(妥当性の確認).....	87
図 4.3.3-18	見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式)の近似解導出.....	88
図 4.3.3-19(1/3)	ミクロ組織変化予測式改定案(1/3)	88
図 4.3.3-19(2/3)	ミクロ組織変化予測式改定案(2/3)	89
図 4.3.3-19(3/3)	ミクロ組織変化予測式改定案(3/3)	89
図 4.3.3-20	見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式形式)と近似式による 溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果の比較.....	90
図 4.3.3-21	ミクロ組織変化予測式改定案による溶質原子クラスター及びマトリックス 損傷の数密度並びにマトリックス Cu 濃度の時間発展の傾向	90
図 4.3.4-1	遷移温度移行量予測式の考え方	92
図 4.3.4-2	遷移温度移行量予測式において考慮される転位運動の障害物	92
図 4.3.5-1	ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の係数最適化 の方針	94
図 4.3.5-2	係数最適化に用いる目的関数	95
図 4.3.5-3	目的関数 $Obj_{\Delta T_{41J}}$ における予測残差の平均値(O_a)の考慮	95
図 4.3.5-4(1/3)	係数最適化の試行ケース一覧(1/3)	96
図 4.3.5-4(2/3)	係数最適化の試行ケース一覧(2/3)	96
図 4.3.5-4(3/3)	係数最適化の試行ケース一覧(3/3)	97
図 4.3.5-5	最適ケースの選定指標	97
図 4.3.5-6	候補ケースの抽出	98
図 4.3.5-7	最適ケースの判定結果	98
図 4.3.5-8	現行予測法及び脆化予測法改定案による ΔT_{41J} の予測結果	100
図 4.3.5-9	現行予測法及び脆化予測法改定案による溶質原子クラスターに関する 各指標の予測結果	100
図 4.3.6-1	現行予測法における原子炉圧力容器の評価に用いる RT_{NDT} 調整値の 計算方法	103
図 4.3.6-2	現行予測法における ΔRT_{NDT} 計算値の補正方法	103

図 4.3.6-3	現行予測法の技術評価時の論点(M_C 関連).....	104
図 4.3.6-4	現行予測法の技術評価結果(M_C 関連).....	104
図 4.3.6-5	予測残差の平均値(O_a)を考慮した場合の予測残差の変化	105
図 4.3.6-6	現行予測法及び脆化予測法改定案により求めた O_a の度数分布 (国内全照射データ).....	105
図 4.3.6-7	現行予測法及び脆化予測法改定案により求めた O_a の度数分布 (鋼材の種類別)	106
図 4.3.6-8	現行予測法及び脆化予測法改定案により求めた O_a の各種初期 パラメータに対する依存性.....	106
図 4.3.6-9	現行予測法における M_C に関する統計的な観点からの検討例	107
図 4.3.6-10	脆化予測法改定案における ΔRT_{NDT} 計算値の補正の考え方 (2020 年 1 月時点).....	107
図 4.3.6-11	現行予測法における M_R の考え方	109
図 4.3.6-12	監視試験結果が ΔRT_{NDT} 予測値を上回る場合の対応.....	109
図 4.3.6-13	現行予測法の技術評価結果(M_R 関連).....	110
図 4.3.6-14(1/2)	脆化予測法改定案におけるマージン設定の考え方 (2020 年 1 月時点) (1/2)	110
図 4.3.6-14(2/2)	脆化予測法改定案におけるマージン設定の考え方 (2020 年 1 月時点) (2/2)	111
図 4.4.1-1	JNES PRE プロジェクトで得られた $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} 実測値の相関.....	115
図 4.4.1-2	現行予測法におけるマトリックス損傷の数密度の式.....	117
図 4.4.1-3	用語の定義(溶質原子クラスター及びマトリックス損傷)	118
図 4.4.2-1	遷移温度移行量の予測のさらなる改善に寄与すると考えられる 諸因子の例	121
図 4.4.2-2	初期組織の照射脆化への寄与に関する模式図	122
図 4.4.2-3	初期降伏応力の影響を考慮した遷移温度移行量予測式 (非線形モデル)	122
図 4.4.2-4	非線形モデルによる ΔT_{41J} の予測結果	123
図 4.4.2-5	非線形モデルによる溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果.....	123
図 4.4.2-6	初期降伏応力の線形寄与分(σ_L)の各パラメータに対する依存性	124
図 4.4.2-7	追加検討で試算した 2 種類の遷移温度移行量予測式	127
図 4.4.2-8	溶質原子クラスターによる寄与のみを考慮した遷移温度移行量予測式 による予測結果.....	127
図 4.4.2-9	溶質原子クラスターとマトリックス損傷を線形和とした遷移温度移行量 予測式による予測結果.....	128
図 4.4.2-10	追加検討結果及び脆化予測法改定案による ΔT_{41J} 計算値の比較	128
図 4.4.3-1	ミクロ組織変化予測式と遷移温度移行量予測式の係数最適化を 2 段階で実施して得られた式による ΔT_{41J} の予測	130
図 4.4.3-2	ΔT_{41J} の予測残差のみを目的関数とした係数最適化で得られた式に による ΔT_{41J} の予測	131
図 4.4.3-3	ΔT_{41J} の予測残差のみを目的関数とした係数最適化で得られた式に による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果	131
図 4.4.3-4	係数最適化に用いるデータに重み付けを行なう際の検討条件	133

図 4.4.3-5	検討条件 1 の重み付けにおける係数最適化の目的関数	134
図 4.4.3-6	検討条件 1 の重み付けによる係数最適化で得られた式による ΔT_{41J} の予測結果	134
図 4.4.3-7	検討条件 1 の重み付けによる係数最適化で得られた式による 溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果	135
図 4.4.3-8	JEAC4201-2007 及び現行予測法による溶質原子クラスターに関する 各指標の予測結果	135
図 4.4.3-9	検討条件 2 の重み付けにおける係数最適化の目的関数	136
図 4.4.3-10	検討条件 2 の重み付けによる係数最適化で得られた式による ΔT_{41J} の予測結果	136
図 4.4.3-11	検討条件 2 の重み付けによる係数最適化で得られた式による 溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果	137
図 4.4.3-12	検討条件 1 及び 2 の重み付けで得られた式並びに脆化予測法改定案 の予測性能の比較	137
図 4.4.3-13	クロスチェックの際の係数最適化の方法	139
図 4.4.3-14	4. 3. 5 項に示した脆化予測法改定案の係数最適化の方法	139
図 4.4.3-15	クロスチェックの係数最適化で得られた式及び脆化予測法改定案による 予測結果の比較	140
図 4.4.3-16	クロスチェックの係数最適化で得られた式及び脆化予測法改定案による 予測値と実測値の比較	140

1. はじめに

原子炉圧力容器は原子力発電所の機器の中でも最も重要な機器の一つであり、その安全性・信頼性を確保することが、原子力発電所の安全性・信頼性を維持する上で重要である。特に原子炉圧力容器胴部の炉心領域は、運転中の原子燃料からの中性子の照射により破壊靭性が低下(以下、照射脆化)することが知られており、経年化する原子力発電所における重要な劣化事象の一つである。

原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法(以下、脆化予測法)については、(一社)日本電気協会(以下、電気協会)の電気技術規程「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201)」(以下、JEAC4201)に規定されている。同規程の最新版である JEAC4201-2007[2013 年追補版]^[1]に規定された脆化予測法(以下、現行予測法)は、2015 年に原子力規制委員会(以下、NRA)による技術評価^[2]が行われて是認(エンドース)^[3]され、その際に、JEAC4201 の次回改定に向けて、「①脆化予測法の改定にむけた具体的な対応及びスケジュール」、「②当該規格の妥当性を示す上で必要な情報の検証と公開に関する対応」及び「③中立性、透明性及び公開性の一層の確保に向けた電気協会の具体的対応」の 3 項目について電気協会の今後の対応を確認する文書が発出^[4]された。電気協会は、同文書に対する回答^[5]において、脆化予測法の基本モデル式の改定要否を検討し JEAC4201 の次回改定を進める旨表明した。これを受けて、現在産業界において物理的現象を考慮した基本モデル式の見直し検討が進められているが、検討に際しては基本モデル式の的確性について特に照射脆化メカニズムに精通した専門家と意見交換が行われることが望まれる。

(一社)日本溶接協会の原子力研究委員会では、金属疲労や確率論的破壊力学などの分野で専門家を集めて研究や意見交換を進めてきた実績があることから、脆化予測法についても同様のスキームを適用し、脆化予測法の策定に携わる産業界の関係者が照射脆化メカニズムに精通した専門家と意見交換することを目的として、原子力研究委員会内に「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」(以下、IET^{注 1)}小委員会)を設置し、付録 1 に示す産業界委員^{注 2)}と専門家委員^{注 3)}からなる委員構成の下、2017 年度から 2019 年度までの 3 ヶ年に渡って活動を実施した。

本報告書は、IET 小委員会の活動期間(2017 年 6 月から 2020 年 1 月まで)における照射脆化に関する国内外の最新知見の調査結果及び IET 小委員会で産業界委員より提示された脆化予測法改定案、さらにそれらについての専門家委員を含む IET 小委員会での議論の内容を取りまとめたものである。

IET 小委員会活動終了時点の委員の一覧を、途中で交代した旧委員と併せて付録 1 に示す。

^{注 1)} “Subcommittee on Validation of Irradiation Embrittlement Trend Curve for Reactor Pressure Vessel Steels”の略称。

^{注 2)} 産業界委員とは、付録 1 に示した(一財)電力中央研究所、国内の電力会社及びプラントメーカーに所属する委員を指す。

^{注 3)} 専門家委員とは、付録 1 に示した国立大学法人及び国立研究開発法人等に所属する委員を指す。

2. 活動計画

IET 小委員会では、まず、国内の現行の脆化予測法を確認した後、国内外の照射脆化に係る最新知見や研究動向などを調査し、最新知見に基づいて産業界委員が提案した脆化予測法改定案の導出プロセスや検証プロセスの的確性について議論することを活動内容とする。具体的には、以下の 3 項目について実施する。

(1) 現行脆化予測法の確認及び照射脆化に関する最新知見の調査

国内の現行の脆化予測法を確認し、照射脆化メカニズムや脆化予測法等に係る国内外の最新知見を調査する。

(2) 脆化予測法改定案に対する技術的知見等に基づくレビュー

照射脆化に関する最新知見を踏まえて、脆化予測法改定案の的確性について議論する。

(3) 脆化予測法改定案における係数の最適化プロセスの検討

監視試験データ等による脆化予測法改定案の係数の最適化プロセスの適切性について議論する。

3. 活動実績

IET 小委員会では、2017 年度から 2019 年度までの 3 ヶ年に渡り、計 8 回の委員会が開催され、「2. 活動計画」に示す各項目について議論が行われた。開催実績及び各回の議題を表 3-1 に示す。また、各回の議事概要を付録 2 に示す。

表 3-1 IET 小委員会開催実績

回次	開催日	議題
1	2017 年 6 月 12 日	(1) 主査の選任及び IET 小委員会の設立趣旨の紹介 (2) 原子炉圧力容器の照射脆化管理 (3) JEAC4201-2007[2013 年追補版]の脆化予測モデル (4) 世界の照射脆化予測式の紹介及び予測性能の比較
2	2017 年 9 月 25 日	(1) 東北大学における照射脆化研究の紹介 (2) 米国予測法(EONY 及び ASTM E900-15)の係数の国内監視試験データに対する最適化結果 (3) アトムプローブにより中性子照射された圧力容器鋼のミクロ組織の評価 (4) 軽水炉照射材料健全性評価研究 照射脆化予測法に係る研究の概要
3	2018 年 1 月 17 日	(1) 京都大学における照射脆化研究の紹介 (2) JEAC4201 の見直しに当たって (3) 中性子照射脆化予測法のミクロ組織変化予測の見直し
4	2018 年 3 月 30 日	(1) 第 3 回 IET 小委員会資料に対するコメント及び回答 (2) 平成 29 年度活動報告書(案)
5	2018 年 11 月 13 日	(1) ニューラルネットワークを用いた圧力容器鋼の中性子照射脆化データの試解析 (2) 中性子照射脆化予測法の遷移温度移行量予測の見直し検討状況 (3) ベイズ統計による照射脆化データの解析(進捗報告)
6	2019 年 3 月 26 日	(1) 第 5 回資料の論点及び追加意見に対する回答 (2) 遷移温度移行量予測における係数最適化の追加検討状況
7	2019 年 7 月 16 日	(1) 関連温度移行量評価に関する研究—中性子照射サンプルの微細組織分析— (2) 中性子照射脆化予測式の基本モデル式の改定案, IET 小委員会での議論結果及び今後の研究課題 (3) IET 小委員会最終取りまとめに向けた今後の活動
8	2020 年 1 月 7 日	(1) 中性子照射脆化予測式改定案への意見集約結果及びそれに対する回答 (2) 過去の IET 小委員会でのコメントの回答 : ΔT_{SC} と ΔT_{MD} を線形和とした結果及び現行予測法と同じ方針でデータに重み付けした結果 (3) 中性子照射脆化予測式改定案における予測値の補正及びマージン設定の考え方 (4) 中性子照射脆化予測式改定案における係数最適化の第 3 者検証の取り組み (5) IET 小委員会最終報告書(案)の進捗状況

4. 活動成果

本章では、IET 小委員会の活動成果を、2章に示した活動計画(1)～(3)それぞれの項目に分けて記載する。

まず、活動計画(1)に挙げられた項目について、4. 1節に現行の脆化予測法を確認した結果を示し、4. 2節に照射脆化に関する最新知見の調査結果を示す。

次に、活動計画(2)及び(3)に挙げられた項目について、4. 3節に専門家委員との議論内容を踏まえて最終的に電中研の委員より提案された脆化予測法改定案の概要を記載し、4. 4節にその最終提案に至るまでの脆化予測法改定案に関する IET 小委員会での議論の内容及び係数最適化におけるプロセスの適切性に関する議論の内容をまとめ、4. 5節には、4. 3節に記載した最終の脆化予測法改定案に対する各専門家委員の意見を主要な観点別に整理して示し、最後の4. 6節に、4. 5節に記載した各専門家委員の意見のうち脆化予測法に関連し、今後の研究課題に区分されたものについてその概要を記載する。

4. 1 現行の照射脆化管理及び脆化予測法の概要

IET 小委員会では、国内の現行の脆化予測法を確認するため、電気技術規程「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法(JEAC4206-2007)」(以下、JEAC4206)^[6]及び JEAC4201 に基づく国内の原子炉圧力容器の照射脆化管理並びに現行予測法について調査した。

4. 1. 1 現行の照射脆化管理の概要

原子炉圧力容器胴部の炉心領域では、運転中に原子燃料から中性子の照射を受けることにより強度が上昇し、破壊靱性が低下する。この破壊靱性の低下は一般に照射脆化と呼ばれるが、具体的には図 4.1.1-1 に示すように延性-脆性遷移領域における破壊靱性の遷移温度の上昇及び延性破壊領域における上部棚靱性の低下として表される。

原子炉圧力容器が照射脆化の進行により破損することのないよう、図 4.1.1-2 に示すように、照射脆化の軽減及び照射脆化管理の取り組みが行われる。照射脆化の軽減に関しては、鋼材中の Cu, P 等の不純物元素を可能な限り低減すると共に、PWR プラントでは原子炉圧力容器の照射量を低減するために熱遮蔽体を設置したり、原子燃料の配置を工夫したりしている。

一方、照射脆化管理の取り組みとしては、図 4.1.1-3 に示すように原子炉圧力容器の鋼材から採取した監視試験片を収納したカプセルを原子炉圧力容器内に装荷して運転中に照射(PWR プラント及び BWR プラントの装荷位置については図 4.1.1-4 参照。また、特に PWR プラントの装荷位置と原子炉圧力容器の照射量の関係については図 4.1.1-5 参照)させ、そのカプセルを供用期間中に計画的に取り出して監視試験を実施し、その結果を踏まえて運転中の照射脆化を考慮しても原子炉圧力容器が破損しないことを確認するための各種評価が行なわれる。

監視試験では、照射脆化の進行がシャルピー衝撃試験結果の平均の遷移曲線から求めた指標の変化(図 4.1.1-6 参照)により把握される。この指標として、延性-脆性遷移領域では吸収エネルギー41J となる温度(以下、遷移温度^{注4)})が、延性破壊領域では上部棚吸収エネルギー(以下、USE)が指標として用いられる。原子炉圧力容器の評価では、図 4.1.1-7 に示すように JEAC4201 に規定された手法に基づき、評価時点における原子炉圧力容器の遷移温度移行量の予測及び USE 低下量の予測が行われる。脆化予測法^{注5)}により評価した遷移温度移行量は監視試験結果と併せて原子炉圧力容器の破壊靭性を評価するための入力値として用いられ、その結果を踏まえて通常運転時や耐圧・漏洩試験時に脆性破壊が生じないよう運転管理を行うための圧力・温度制限曲線の設定(図 4.1.1-8 参照)や、事故時に原子炉圧力容器内に低温水が注入された場合(加圧熱衝撃事象と呼ばれ、概要については図 4.1.1-10 参照)を想定した健全性評価(以下、PTS 評価)が実施される^{注6)}。圧力・温度制限曲線の設定及び PTS 評価では、原子炉圧力容器の胴部に仮想的に表面亀裂を想定^{注7)}し、破壊力学に基づき亀裂最深部に生じる荷重と亀裂最深部の破壊靭性を比較して脆性破壊が生じないことを確認する評価が行われる。

圧力・温度制限曲線は、主として起動・停止時や耐圧・漏洩試験時などの原子炉圧力容器の加熱・冷却時に脆性破壊が生じないよう、運転温度に応じて許容される圧力を線図として表したものであり、原子炉圧力容器の温度や圧力がその線図の範囲内で推移するようプラントの運転管理が行われる(図 4.1.1-8 参照)。圧力・温度制限曲線の設定に際しては、図 4.1.1-9 に示すように深さが胴部板厚の 1/4 となる大きな表面亀裂を想定したり、応力拡大係数に安全率(起動・停止時は 2、耐圧・漏洩試験時は 1.5)を考慮したりするなど保守的な条件で評価が行われる。

一方、PTS 評価は、原子炉圧力容器に接続する配管が破損したり、圧力境界となる弁が閉止できずに冷却材が流出し続け、通常の主冷却系統では炉心に注入される冷却水の量が維持できず非常用炉心冷却系統による炉心の冷却が必要となる冷却材喪失事故等時が対象となる。PTS 評価では、このときに想定亀裂最深部に生じる荷重の推移が図 4.1.1-11 に示すように応力拡大係数を用いて評価され、評価時点における原子炉圧力容器の照射脆化の進行を考慮して設定した破壊靭性遷移曲線と比較される。原子炉圧力容器の破壊靭性遷移曲線は、当該の鋼材の破壊靭性試験結果と脆化予測法により評価した遷移温度移行量を踏まえて、図 4.1.1-12 に示す手順で設定される。その判定基準は、PTS 事象時の応力拡大係数が破壊靭性遷移曲線と交差しないことである(図 4.1.1-13 参照)。PTS 評価に際して安全率は考慮されないが、現行の評価手法には、想定亀裂の大きさや判定基準等に図 4.1.1-14 に示すような保守性が見込まれている。

なお、上記で述べた PTS 評価手法は、現行の「実用発電用原子炉及びその附属施設の技

^{注4)} この遷移温度の照射脆化に伴う移行量は ΔT_{41J} あるいは ΔT_{r30} と表記され、JEAC4201 では関連温度移行量(ΔRT_{NDT} と表記)とも呼ばれる。本報告書では、特段の場合を除き遷移温度の移行量は ΔT_{41J} の表記で統一する。

^{注5)} 本報告書では、原子炉圧力容器の照射脆化に伴う遷移温度の移行量(ΔT_{41J})を評価する手法を脆化予測法と称する。

^{注6)} 評価対象は PWR プラント。

^{注7)} 国内では原子炉圧力容器の製造時や供用期間中の非破壊検査により、破壊の起点となるような亀裂が認められた事例は認められていない。

術基準に関する規則の解釈」(以下、技術基準規則解釈)^[7]において引用される JEAC4206-2007^[6]に基づく手法であるが、既に同規程の 2016 年版^[8]が発行されている。2016 年版では PTS 評価手法について、最新知見を踏まえて想定亀裂や破壊靱性遷移曲線の設定方法などの全面的な見直しが行われた。具体的には、PTS 評価に用いる破壊靱性遷移曲線として 5%信頼下限のマスターカーブの定式を採用するとともに、電気技術規程「フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法」(JEAC4216-2015)^[9]に基づく破壊靱性試験により設定した T_0 (マスターカーブ法の参考温度)を破壊靱性評価に用いることができるよう見直しが行われた(図 4.1.1-15 参照)。

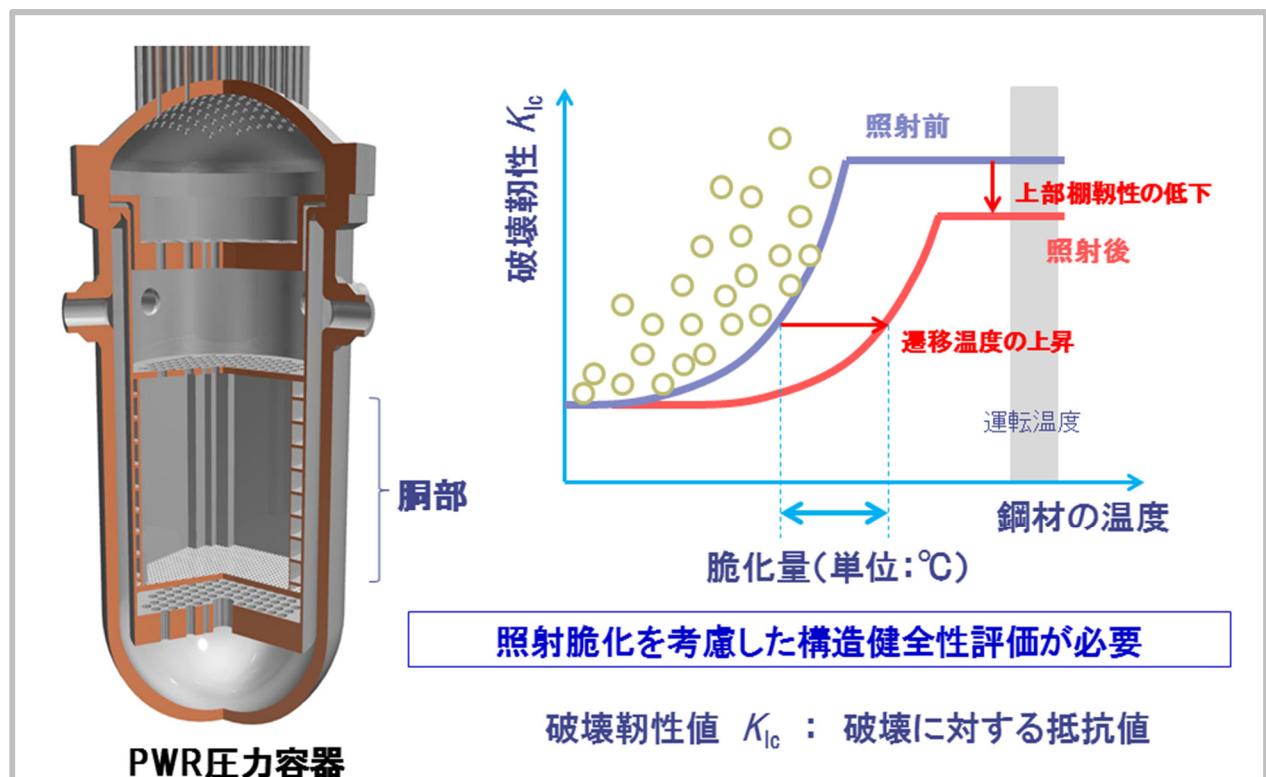


図 4.1.1-1 原子炉圧力容器鋼の中性子照射による破壊靱性の低下

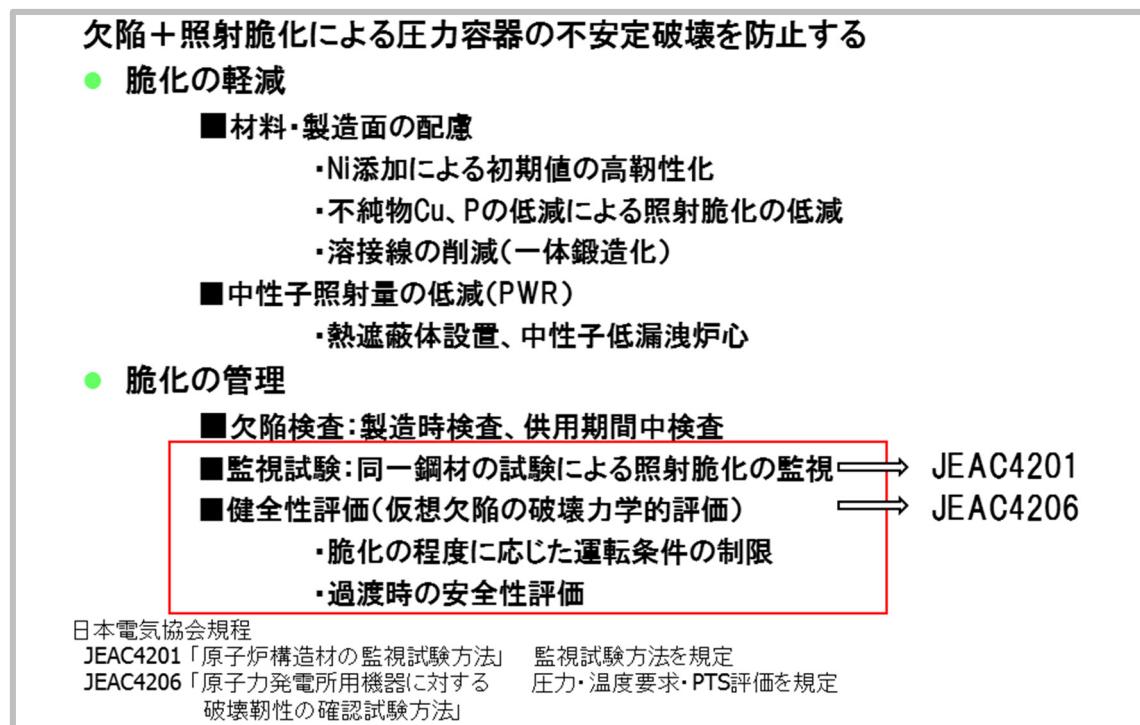


図 4.1.1-2 原子炉圧力容器における照射脆化への対応

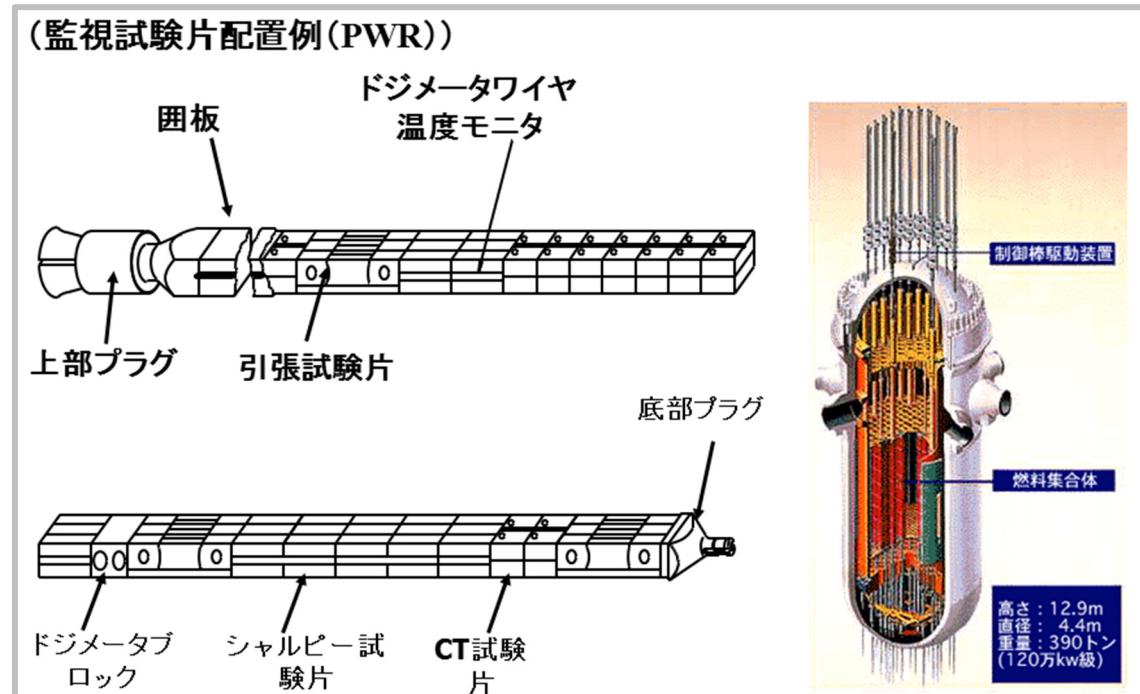


図 4.1.1-3 監視試験カプセルの概要(PWR プラントの例)

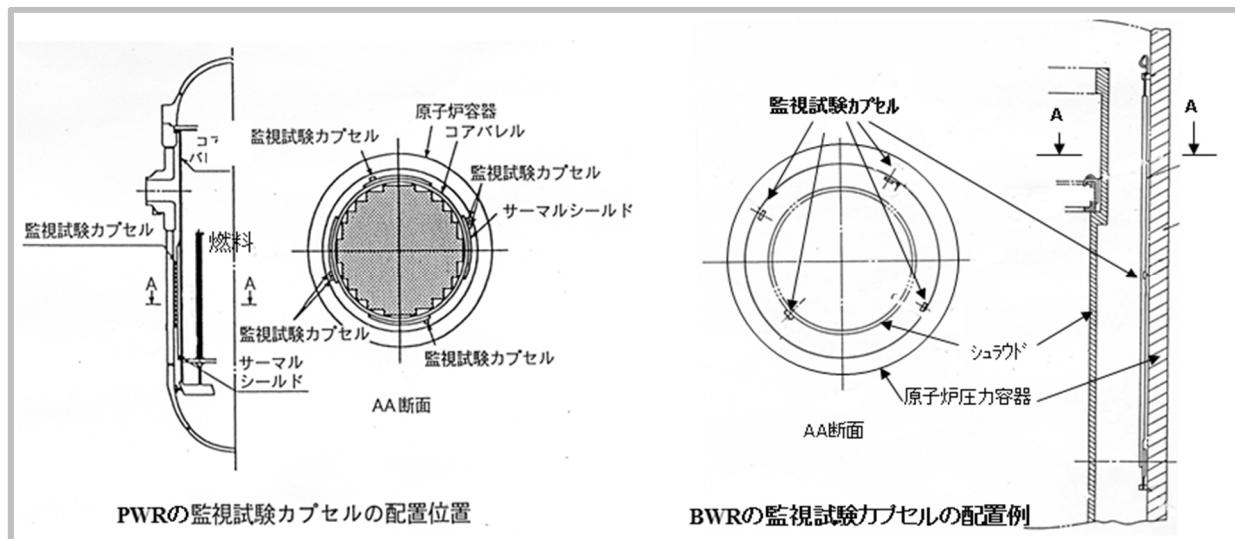


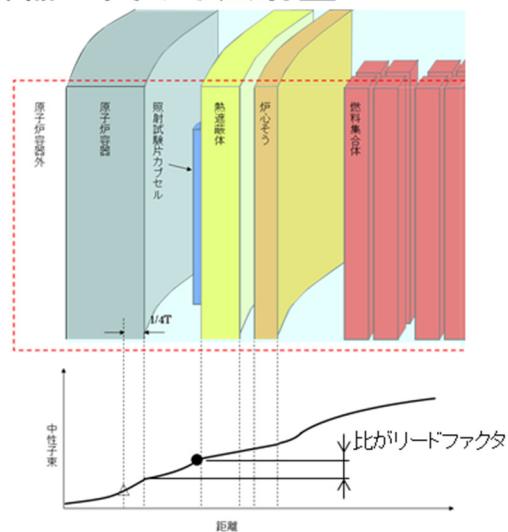
図 4.1.1-4 原子炉圧力容器内における監視試験カプセルの装荷位置

監視試験片の照射位置における中性子束の、原子炉圧力容器内面あるいは他の位置における最大中性子束に対する比[SA-1200 用語の定義(12)]
少なくとも原子炉圧力容器内面及び(1/4)tについてリードファクタを求める。[SA-2362(1)]

$$\text{リードファクタ} = \frac{\text{カプセルが受ける照射量}}{\text{原子炉圧力容器が受ける照射量}}$$

【PWRの例】

- ・監視試験片カプセルの中性子束
=RV内面の中性子束
×リードファクタLF(約1~3)
- ・1/4T位置の中性子束
=RV内面の中性子束
×板厚減衰(0.6~0.7)
(外面位置: ×0.1~0.2)

図 4.1.1-5 監視試験カプセル装荷位置と原子炉圧力容器における照射量の関係
(PWR プラントの例)

- 照射による遷移温度移行量

- 吸収エネルギー—41 J ($= \Delta RT_{NDT}$), 吸収エネルギー—68 J
- 横膨出量0.90 mm
- 延性破面率50%

- 上部棚吸収エネルギー減少率

- $\Delta USE = (USE\text{初期値} - USE\text{照射後}) / USE\text{初期値} (\%)$

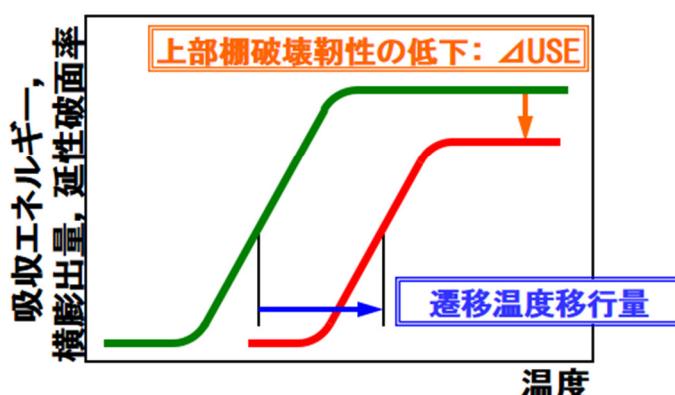


図 4.1.1-6 監視試験におけるシャルピー衝撃試験及び測定指標

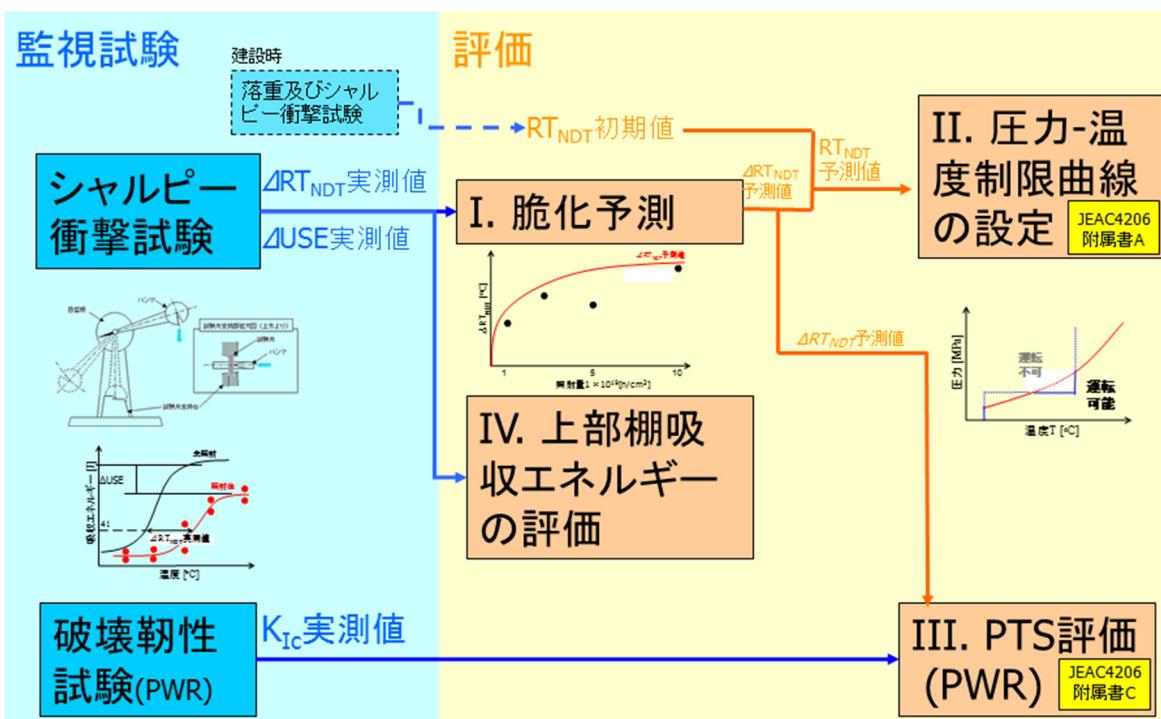
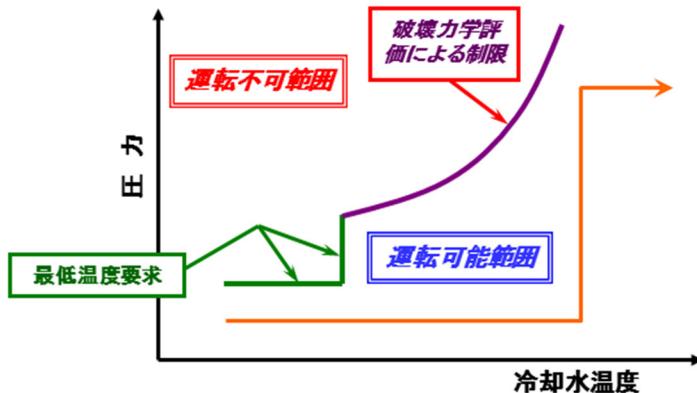


図 4.1.1-7 監視試験と原子炉圧力容器における各種評価の関係

- $\alpha \cdot K_{I_p}$ (圧力による K_I) + K_H (熱応力による K_I) < K_{Ic}
 - > α : 2.0 [供用状態A・B], 1.5 [耐圧・漏洩試験]
- 上式を満足するように加熱・冷却率と圧力の関係を設定する。
- ボルト締付け荷重が作用する部位に対する最低温度要求
 - [例] 供用状態A・B: 圧力 > 供用前耐圧試験圧力の20% $\Rightarrow RT_{NDT} + 67^\circ\text{C}$ 以上
 - 耐圧・漏洩試験: 圧力 > 供用前耐圧試験圧力の20% $\Rightarrow RT_{NDT} + 50^\circ\text{C}$ 以上

図 4.1.1-8 通常運転時における圧力・温度制限の概要^[6]

③ 材料の破壊靭性: K_{Ic}

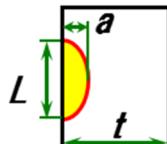
> K_{Ic} : 温度と RT_{NDT} の関数

$$> RT_{NDT} = RT_{NDT[\text{初期値}]} + \Delta RT_{NDT}$$

① 最大仮想欠陥

$$a = t/4$$

$$a/L = 1/6$$



② 応力拡大係数: K_I

> 内圧による応力及び熱応力を考慮

④ 健全性評価

$[K_{Ic}(\text{供用期間中}) > K_I] + [\text{最低温度要求}]$
を満足するように圧力・温度の関係を設定

- > 安全率: 2 (起動、停止)
- 1.5 (漏洩試験)

[*] 詳細な評価方法は附属書A「非破壊防止のための解析方法」に規定

図 4.1.1-9 圧力・温度制限曲線の設定に際しての評価の流れ^[6]

- 加圧熱衝撃(Pressurized Thermal Shock: PTS)事象は、加圧下の原子炉圧力容器で、供用状態C、Dに該当する緊急炉心冷却系(ECCS)の作動に伴う安全注入水の注入等により容器内の急激な冷却が起こると、内圧による膜応力と重畳して高い引張応力が容器内面に発生する現象。
- 容器の破壊靭性が中性子照射と急激な冷却により相当低下し、しかも亀裂のような欠陥が予め内面近傍に存在する場合には、PTS事象によって発生する内面引張応力がある限度を超えると、亀裂が進展して原子炉圧力容器が損傷するおそれがあるとされているものである。
- JEAC4206では、このようなPTS事象における原子炉圧力容器の損傷防止のため、破壊力学に基づく健全性評価手法を規定している。

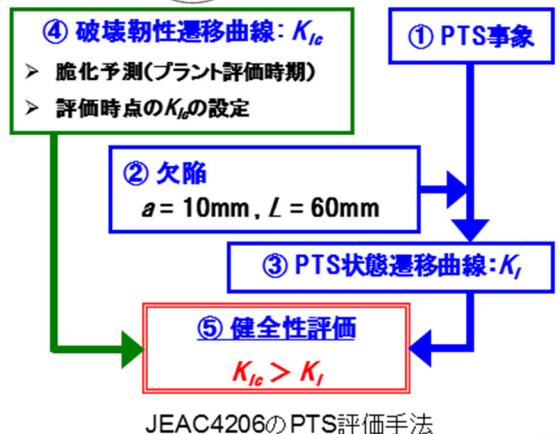
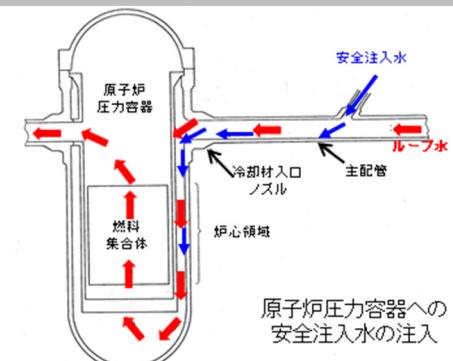
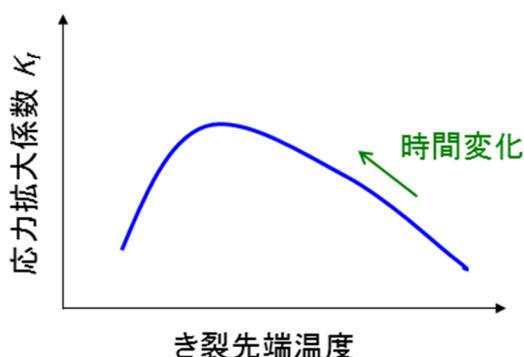


図 4.1.1-10 事故時の原子炉圧力容器の健全性評価(PTS 評価)の概要(JEAC4206-2007)^[6]

- 設定したPTS事象(温度過渡及び圧力過渡)から温度分布解析及び応力解析を行い、板厚内の応力変化の時刻歴を求める。
- 最大仮想欠陥及び応力変化の時刻歴を用い、整備されている応力拡大係数評価式(Buchheit and Bamford式)^{*}を用いて時間に対するき裂先端温度と K_I との関係(PTS状態遷移曲線)を求める。



* 文献[10]

図 4.1.1-11 事故時の温度・圧力過渡を踏まえた PTS 状態遷移曲線の設定
(JEAC4206-2007)^[6]

- 仮想欠陥最深部 a での中性子照射量 f
- 対象とする原子炉圧力容器炉心領域材料の破壊靱性データを JEAC4201 の脆化予測法を用いて温度方向にシフト($\Delta T_{K_{lc}}$)し、次式で下限包絡線を設定
 - ◆ $K_{lc} = 20.16 + 129.9 \exp[0.0161(T - T_p)]$

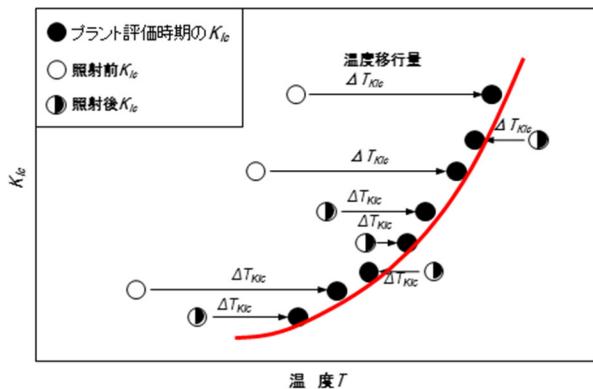
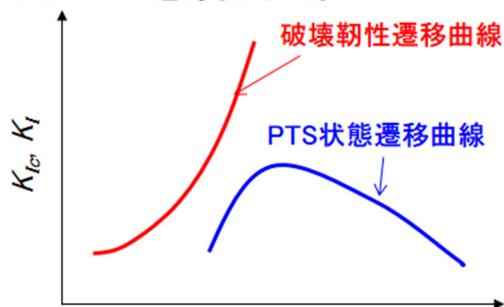


図 4.1.1-12 照射脆化を考慮した破壊靱性遷移曲線の設定(JEAC4206-2007)^[6]

■ [詳細評価]

プラント評価時期に対して、PTS状態遷移曲線と破壊靱性遷移曲線が交差しないことを確認する。



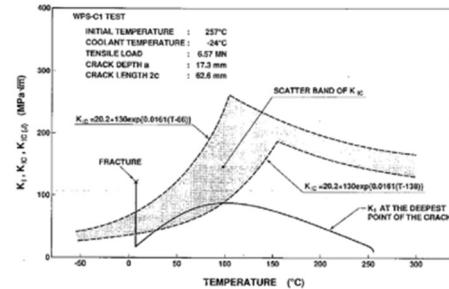
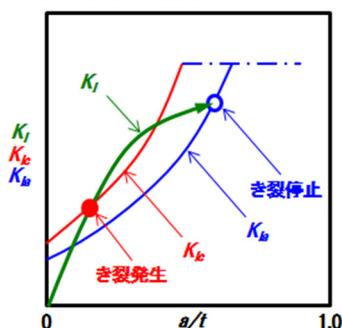
■ [一般評価]

プラント評価時期の破壊靱性曲線が次式の K_{lc} 評価式を満足すればよい。

$$\text{◆ } K_{lc} > 20.16 + 129.9 \exp[0.0161(T - 125)]$$

図 4.1.1-13 PTS 評価における原子炉圧力容器の健全性の判定基準(JEAC4206-2007)^[6]

- 仮想欠陥深さ10mmは、製作時及び供用期間中検査の非破壊検査(板厚2%相当は検出)から保守的。表面に想定することも保守的。
- 非延性破壊発生のみを評価し、き裂の伝播停止は考慮していない。(PTS事象では外面側は温度が高く、き裂が進むにつれて、材料のき裂伝播停止靭性は上がる。)
- 高温予荷重効果(温度が低下する過程で、応力拡大係数Kが単調減少しているならば、Kが破壊靭性K_{IC}を上回っても非延性破壊は起こらない)を考慮していない。

Fig. 10. Relationship between experimentally obtained K_I versus temperature curve and K_{Ic} versus temperature curve in WPS-C1 test.図 4.1.1-14 PTS 評価に際して考慮される主な保守性(JEAC4206-2007)^{注8)}

	JEAC4216制定以前	JEAC4216-2011	JEAC4216-2015
評価方法	帰納的な評価 	マスター曲線法による破壊靭性評価 	超小型試験片によるマスター曲線法評価
特徴	様々な形状・寸法の破壊靭性試験の膨大なデータから破壊靭性の下限を評価	統計的に破壊靭性分布を取り扱うことで少ない数の試験片(最少で6~8個)から破壊靭性の中央値や統計的な信頼下限を評価	破断後のシャルピー試験片からも採取できる超小型C(T)試験片を用いてマスター曲線法により破壊靭性の中央値や下限値を評価

* 圧力容器鋼などに用いられるフェライト鋼を対象とした、延性-脆性遷移温度域における破壊靭性を評価するための方法。

図 4.1.1-15 JEAC4216^[9]に基づくマスター曲線法による破壊靭性評価の概要

注8) 図中の右側のグラフは、Elsevier 社の許可を得て文献[11]のグラフを転載した。

4. 1. 2 JEAC4201-2007[2013年追補版]の脆化予測法の概要

4. 1. 1項に示した原子炉圧力容器の脆化管理に際しては、脆化予測法により評価した遷移温度移行量を、圧力・温度制限曲線の設定や PTS 評価の入力値として用いる。脆化予測法は、国内の原子炉圧力容器鋼材の照射脆化に伴う巨視的な材料挙動の変化(遷移温度の上昇)を、実用性も含めた工学的な観点から簡易な数式で評価できるよう定式化されたものであり、監視試験結果を踏まえた補正やマージンの設定方法を含めて具体的な評価方法が JEAC4201 に規定されている。現行予測法は、JEAC4201-2007[2013年追補版]^[1]に規定されたものであり、JEAC4201 の 1991 年版^[12]に国内鋼材向けの脆化予測法が最初に規定されて以降、2 回目に改定された脆化予測法である(図 4.1.2-1 参照)。JEAC4201 の脆化予測法は、JEAC4201-2007(以下、2007 年版)^[13]で基本モデル式^{注 9)}が全面的に見直され、それ以前の照射脆化に寄与すると考えられる鋼材の化学成分や照射条件に対する傾向分析結果を踏まえて定式化された関数フィットに基づく式から、照射に伴うミクロ組織変化を踏まえた式に変更された。現行予測法は 2007 年版の基本モデル式を踏襲して 2012 年までに得られた監視試験データを踏まえてフィッティング係数を見直したものである。このため、まず 2007 年版の脆化予測法の基本モデル式の考え方について述べる。

2007 年版の基本モデル式では遷移温度移行量を図 4.1.2-2 に示す式で定式化している。この式では、照射欠陥が転位運動の障害として作用し硬化することにより降伏応力が上昇し、それに伴い遷移温度が上昇するとの硬化型の脆化を考慮している。また、遷移温度の上昇に寄与する照射欠陥として 3 次元アトムプローブトモグラフィー(以下、APT)で測定された溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類を考慮しており、両者が短範囲で相互作用するとしてそれによる遷移温度移行量の二乗和平方根で表される。

溶質原子クラスターについては、図 4.1.2-3 に示すように過飽和で析出した Cu を核として形成される均一核生成の照射促進クラスターと、マトリックス損傷を核とする不均一核生成の照射誘起クラスターの 2 種類から構成されると想定している。照射により形成される溶質原子クラスターの体積率(V_f)は図 4.1.2-3 の式に示す通り、溶質原子クラスターの平均体積(図 4.1.2-3(2/2)の赤枠部)と溶質原子クラスターの数密度(C_{SC})の積として表され、Cu 含有量、Ni 含有量、中性子束及び照射量をパラメータとして定式化される。遷移温度移行量への換算に際しては、溶質原子クラスター体積率の平方根が一次近似として遷移温度移行量に比例するとの前提に基づき、図 4.1.2-4 に示す比例係数 ξ_{16} を乗じる。

一方、マトリックス損傷の数密度(C_{MD})については、図 4.1.2-5 に示すように空孔型照射欠陥の形成は限定的との知見に基づき、主として転位ループを想定することとし、Ni 含有量、照射温度及び照射量をパラメータとして定式化される。また、既に述べた通りマトリックス損傷は照射誘起クラスターの核として消費されるとの想定により、その分は溶質原子クラスター項において考慮されることになり、マトリックス損傷分から差し引かれる。言い換えると、マトリックス損傷は照射と共に形成され続けるが、同時にその一部は溶質原子クラスター形成で消費されその分は陽には存在しないとしてモデル化している。一方、差し引いた後のマトリックス損傷の

^{注 9)} 本報告書では、脆化予測法の基となるモデル式を基本モデル式と称する。このモデル式は通常複数の数式で構成され、これら数式中の係数を照射データに対する最適化により決定することで、脆化予測法は策定される。

遷移温度移行量への換算に際しては、転位ループの直径が大きく変化しないとの想定に基づき、数密度の平方根に比例するとして図 4.1.2-6 に示す比例係数 ξ_{17} を乗じる。

次に各パラメータに対する定式化の考え方として、中性子束(ϕ)、照射温度(T_{irrad})、マトリックスCu濃度(C_{Cu}^{mat})^{注10)}の定式化の考え方を図4.1.2-7～9に示す。まず、中性子束については、中性子束が高いほど単位時間当たりの原子の拡散が助長され、溶質原子クラスターの形成を促進すること、中性子束が非常に低い場合($< 10^9[n/cm^2 \cdot s, E > 1\text{MeV}]$)は照射温度の寄与が無視できないとして D_{Cu} は定式化された。照射温度については、Cu含有量の低い材料に対して提案されたJones-Williamsの F_T モデル^[14]をマトリックス損傷に対して適用して定式化された。マトリックスCu濃度については、照射促進クラスターの形成に寄与することを考慮し、溶質原子クラスターの形成及び成長によって減少するとして定式化された。

以上の考え方に基づき定式化された 2007 年版の基本モデル式を図 4.1.2-10 にまとめて示す。

2007 年版の基本モデル式の各項の係数を最適化した時点の国内監視試験のデータベースを、Cu 含有量と照射量について整理して図 4.1.2-11 に示す。同図に 2007 年版発行以降に新たに得られた監視試験データを追加する(図 4.1.2-11 の赤実線囲み部分)と、新たなデータは、既存のデータベースの範囲を超える Cu 含有量と照射量の組み合わせのデータが存在することがわかる。また、図 4.1.2-12 に国内監視試験片の APT 分析により得られた溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関を整理して示す。2007 年版発行以降に得られた $5 \times 10^{19}[n/cm^2, E > 1\text{MeV}]$ を上回る比較的高照射量のデータについても、従来データと同様に溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量に一定のばらつきの範囲で線形の相関が認められることがわかる。

現行予測法の策定に際しては、2007 年版の基本モデル式を踏襲しながら、新たに得られた監視試験データを追加して係数を再度最適化する見直しが行われた。2007 年版の脆化予測法から現行予測法への変更点を表にまとめて図 4.1.2-13 に示す。現行予測法では、最適化に際して監視試験データに対しては照射時間の 2 乗の重みを考慮すると共に新たに試験炉照射データ(重みは一律 15EFPY^{注11)}の 2 乗相当)を追加して、特に高照射量領域の遷移温度移行量の予測性を重視して見直している。また、最適化計算の手法についても見直しを行い、マージンの設定についても考え方を一部見直している。

JEAC4201-2007[2013 年追補版]については、NRA による技術評価が行われて規制に適用可能と評価^[2]され、技術基準規則解釈^[7]において遷移温度移行量の評価に際しては現行予測法を適用することが定められた^[3]。また、技術評価結果を受けて、JEAC4201 の今後の改定で脆化予測法の基本モデル式が改定された場合に、それを技術評価する際の視点が示された(図 4.1.2-14 参照)^[2]。同時に、技術評価結果を踏まえて電気協会の今後の対応を確認する文書が NRA より発出され、電気協会はそれに対して回答した(NRA の文書^[4]とそれに対する電気協会の回答^[5]については図 4.1.2-15 参照)。

^{注10)} 鋼材のマトリックス中に固溶している Cu の濃度。

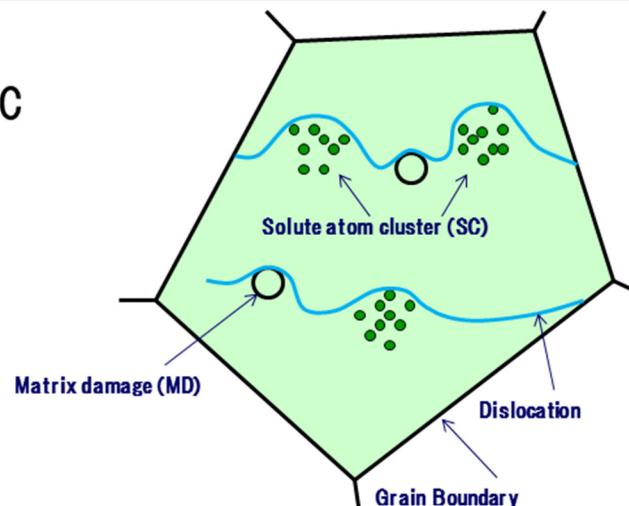
^{注11)} EFPY は定格負荷相当年数(Effective Full Power Year)の略称であり、実照射時間に相当する。

- JEAC4201-1991^{*1} 国内・米国監視試験データおよび国プロ(PTSプロジェクト^{*2})データを用いて開発
- JEAC4201-2007^{*3} 国内監視試験データおよび照射脆化機構に関する知見の蓄積を受けて、国内監視試験データを用いて開発
- JEAC4201-2007(2010年追補版) 解説の充実
- JEAC4201-2007(2013年追補版)^{*4} 高照射量の監視試験データの蓄積、および試験炉照射データを考慮して改訂

※1 文献[12]
 ※2 文献[15]
 ※3 文献[13]
 ※4 文献[1]

図 4.1.2-1 JEAC4201 に規定された脆化予測法の変遷

- 考慮した脆化要因
 - 溶質原子クラスター、SC
 - マトリックス損傷、MD



- 考慮しない脆化要因
 - 空孔型損傷
 - 粒界脆化

JEAC4201-2007:

$$\Delta RT_{NDT} = \sqrt{(\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2}$$

図 4.1.2-2 2007 年版の脆化予測法における照射脆化メカニズムの考え方^{[16]注 12)}

注 12) 図中の式における「 ΔRT_{NDT} 」は、脆化予測法により求まる遷移温度移行量(ΔT_{41f})を意味する。

● 2種類の溶質原子クラスターに分類

- 照射誘起クラスター

- ✓ 不均一核生成(マトリックス損傷を核として形成)
- ✓ Ni, Mn, Siが主成分だが、Cuの量に応じてCuを含む

- 照射促進クラスター

- ✓ 均一核生成(過飽和のCuの析出を核として形成)
 - Cu原子の拡散のしやすさの影響を受ける(熱時効など)
- ✓ Ni, Mn, Si, Cuが主成分

$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot \left(C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot \left(1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0 \right) \right)^2$$

図 4.1.2-3(1/2) 溶質原子クラスターに関する式(溶質原子クラスター数密度)^[16]

● モデル開発当時は溶質原子クラスターの体積に関するデータが限られていた

● 以下の仮定に基づきモデルを設定

- Cu原子の量の影響を受ける
- Ni原子の量の影響を受ける
- 照射速度と照射量の影響を受ける

$$V_f = \left[\xi_{15} \cdot f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \cdot \left(1 + \xi_{13} \cdot (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}} \right)^2 + \xi_9 \cdot (1 + \xi_{10} \cdot D_{Cu}) \cdot \phi t \right] \cdot C_{SC}$$

$$f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) = \left(\xi_{11} \frac{C_{Cu}^0 - C_{Cu}^{mat}}{C_{SC}} + \xi_{12} \right)$$

図 4.1.2-3(2/2) 溶質原子クラスターに関する式(溶質原子クラスター体積率)^[16]

● 脆化への寄与は溶質原子クラスター体積率の平方根に比例

- 析出物の硬化モデルおよび実測データに基づく
- 溶質原子クラスター直径は大きく変わらない⇒影響小と想定
- 溶質原子クラスター化学組成は大きく変わらない⇒影響小と想定

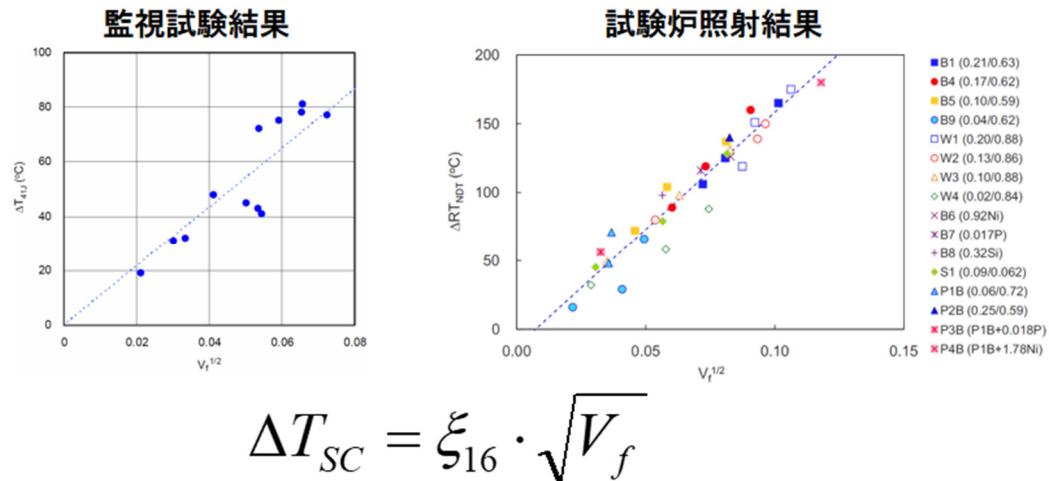
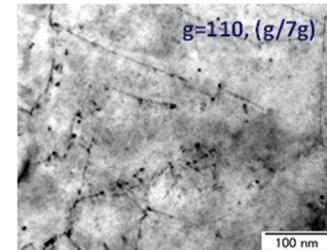


図 4.1.2-4 溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関^{[16]注 13), 注 14)}

● 転位ループがマトリックス損傷と想定

- TEMにより転位ループの形成を確認
- 空孔型欠陥の形成は限定的
 - ✓ 脆化に寄与しない
- ループ形成はNi, Mnの影響を受ける
 - ✓ Mnの量はあまり変わらない
- 低Cu材の温度依存性モデルあり(F_T)
- 転位ループは溶質原子クラスター形成の核となる
 - ✓ 溶質原子が偏析したループの観察例多数



転位ループの例

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

図 4.1.2-5 マトリックス損傷の数密度の式^{[16]注 15)}

注 13) 図中の右側のグラフ縦軸の「 ΔT_{NDT} 」は、遷移温度移行量(ΔT_{41J})の実測値を意味する。

注 14) 図中の左側のグラフは、電中研の許可を得て文献[16]のグラフを転載し、右側のグラフは、ASTM International 社の許可を得て文献[17]のグラフを転載した。Reproduced, with permission from the Journal of ASTM International, Vol.6, Issue 7, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

注 15) 図中の右上の写真は、電中研の許可を得て文献[18]の写真を転載した。

- 脆化への寄与はマトリックス損傷の数密度の平方根に比例

- 転位ループによる硬化モデルに基づく
- ループ直径は大きく変わらない⇒影響小と想定

$$\Delta T_{MD} = \xi_{17} \cdot \sqrt{C_{MD}}$$

図 4.1.2-6 マトリックス損傷による遷移温度移行量の式^[16]

- 照射速度が高いと、平均原子空孔密度が上昇

- 単位時間当たりの原子の拡散を助長
⇒溶質原子クラスターの形成に寄与
- 照射速度が非常に高い場合にはインターラスケード相互作用により条件が変わる
⇒この効果は現在考慮していない

- 非常に低い照射速度($<\sim 10^9 n/(cm^2\cdot s)$)では、温度(熱平衡原子空孔)の寄与が無視できなくなる

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + D_{Cu}^{irrad} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$$

図 4.1.2-7 照射速度(中性子束)の寄与の考え方^[16]

- 照射温度は溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の両者の形成に寄与する。

- 2007年版では、マトリックス損傷への寄与だけを考慮

- Jones-Williamsの F_T モデル^{*}が低Cu材料(=マトリックス損傷)に対して提案されていた。
- 照射誘起クラスターはマトリックス損傷を核とするため、溶質原子クラスター形成にも温度依存性がある。

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

※ 文献[14]

図 4.1.2-8 照射温度の寄与の考え方^[16]

● 照射促進クラスターはマトリックスCuの関数

- 固溶しているCu原子(=マトリックスCu)が照射促進クラスターの形成に寄与
- マトリックスCuの減少に伴い照射促進クラスターの形成は減速する
- マトリックスCuはクラスターの「形成」および「成長」によって減少する

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{Sc}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$$

図 4.1.2-9 マトリックス Cu 濃度の寄与の考え方^[16]

Microstructure formation

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} &= \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2 \\ \frac{\partial C_{MD}}{\partial t} &= \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \\ D_{Cu} &= D_{Cu}^{thermal} + D_{Cu}^{irrad} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2} \quad \frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{Sc}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}\end{aligned}$$



Mechanical property change due to microstructure change

$$\begin{aligned}\Delta T_{SC} &= \xi_{16} \cdot \sqrt{V_f}, \quad V_f = \left(\xi_{15} \cdot f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \cdot \left(1 + \xi_{13} \cdot (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}} \right)^2 + \xi_9 \cdot (1 + \xi_{10} \cdot D_{Cu}) \cdot \phi t \right) \cdot C_{SC} \\ \Delta T_{MD} &= \xi_{17} \cdot \sqrt{C_{MD}} \quad f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) = \left(\xi_{11} \frac{C_{Cu}^0 - C_{Cu}^{mat}}{C_{SC}} + \xi_{12} \right) \\ \Delta RT_{NDT} &= \sqrt{(\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2}\end{aligned}$$

図 4.1.2-10 2007 年版の脆化予測法の基本モデル式^{[16,19]注 16)}

注 16) 図中の式における「 ΔRT_{NDT} 」は、脆化予測法により求まる遷移温度移行量(ΔT_{41f})を意味する。

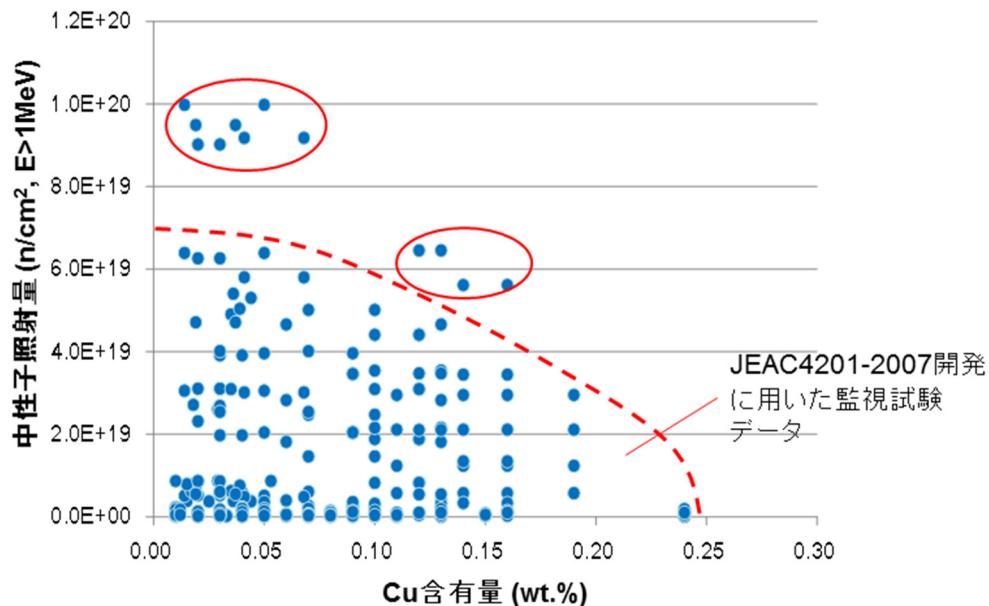


図 4.1.2-11 現行予測法の策定に際して新たに考慮された監視試験データ^{[18]注 17)}

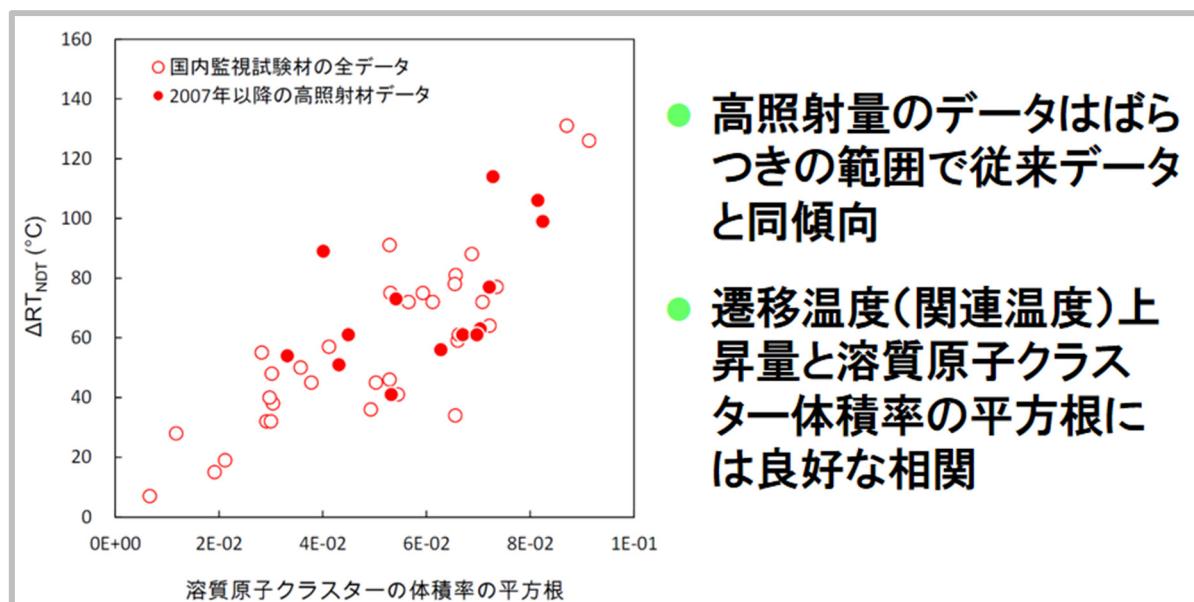


図 4.1.2-12 溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関
(監視試験片の分析結果)^{[18]注 18), 注 19)}

注 17) 同図は、電中研の許可を得て文献[18]のグラフを転載した。

注 18) 図中のグラフ縦軸の「 ΔRT_{NDT} 」は、遷移温度移行量(ΔT_{41J})の実測値を意味する。

注 19) 図中のグラフは、電中研の許可を得て文献[18]のグラフを転載した。

項目	2007年版	2013年追補版
1.脆化予測式		
(1) 関数形	反応速度式型の予測式	(変更なし)
2.パラメータ最適化		
(1) データベース	2006年12月末までの国内監視試験データ	2012年6月末までの国内監視試験データ 国内の試験炉照射データ
(2) 最適化計算法	手動最適化+自動最適化	自動最適化
(3) ミクロ組織変化(APT)	考慮。最適化後、ミクロ組織変化を予測できるか確認。	考慮。最適化に含める(5%)
(4) 重み付け	CuおよびNi含有量の高い1鋼種について重み付け($\times 5$)	監視試験データは(EFPY) 2 で重み付け 初期値及び試験炉照射データは225(15 2)で重み付け

図 4.1.2-13(1/2) 現行予測法における 2007 年版の脆化予測法からの変更点(1/2)

項目	2007年版	2013年追補版
3.補正方法	N回 M_c 補正	(変更なし)
4.マージン(M_R)		
(1) 補正なし	標準偏差の2倍 20°C	(変更なし) 22°C
(2) M_c 補正あり	補正なしの標準偏差の1倍 10°C	N-1回 M_c 補正の標準偏差の2倍* 18°C

* : 将来の予測性を考慮し、N-1回 M_c 補正の標準偏差を用いた。

用語の定義

- N-1回 M_c 補正 : N 回目のデータの予測値を求める際に、N-1回目までのデータから計算した補正值(M_c)を使用する。
- N 回 M_c 補正 : N 回目のデータの予測値を求める際に、N回目までのデータから計算した補正值(M_c)を使用する。

図 4.1.2-13(2/2) 現行予測法における 2007 年版の脆化予測法からの変更点(2/2)

- 基本モデル式を改定する際の視点
 - ① 関連する学協会と連携しているか
 - ② 予測式改善に寄与する可能性があると指摘があった事項が考慮されているか
 - ・ 引張試験結果
 - ・ 測定誤差の影響
 - ・ Cu > 0.16%、高Ni材で予測値が過大になること
- データの重み付け
 - 重み付けをする場合は合理的な理由が説明されていること
- 試験炉照射データの取扱い
 - データに幅がある場合に保守的な入力値とするなどデータの取扱いが適切か
- M_C 補正の意味
 - 個別プラントごとに予測値に偏りが生じる理由について原因分析を行なうこと

図 4.1.2-14 JEAC4201 次回改定版の技術評価の際の確認項目^[2]

- 原子力規制庁から電気協会に文書^{*1}が発出され、以下の点について電気協会の今後の対応を確認した
 - ① 予測式改定に向けた具体的な対応及びスケジュール
 - ② 当該規格の妥当性を示す上で必要な情報の検証と公開に関する対応
 - ③ 中立性、透明性及び公開性の一層の確保に向けた対応
- これに対し、日本電気協会は、以下を原子力規制庁に回答した
 - ① 脆化予測法の改定検討を継続して進められるように監視試験データ入手し、予測性能の適切性を確認していくこと
 - ② 今後、監視試験で予測を外れるデータが得られた場合には当該規格の改定要否検討を行い、その結果を原子力規制庁に報告すること
 - ③ 2018年予定の改定に向けて最新知見に基づく中性子照射脆化に対する影響因子の検討、基本モデル式の改定要否、 M_C 補正の妥当性の検討、さらに別モデルの採用要否も含めて検討する予定であること

^{*1} 文献[4]^{*2} 文献[5]図 4.1.2-15 電気協会に対する NRA の発出文書^[4]と電気協会の回答^[5]

4. 2 照射脆化に関する最新知見の調査

IET 小委員会では、照射脆化に関する最新知見の調査の一環として、国内の原子炉圧力容器鋼材の溶質原子クラスターの分析状況、国内で実施された照射脆化メカニズムに関する研究、国外の脆化予測法及び国内照射データの統計解析に関する研究について調査した。

4. 2. 1 国内の原子炉圧力容器鋼材の溶質原子クラスターの分析状況(電中研における研究)

現行予測法の基本モデル式の係数最適化に際しては、国内 BWR プラント及び PWR プラントの監視試験で得られた ΔT_{41J} 実測値との予測残差だけでなく、APT 分析が実施されているものについては、溶質原子クラスター体積率の実測値との予測残差も考慮している。溶質原子クラスター体積率のデータベースは、全て(一財)電力中央研究所(以下、電中研)に設置された APT 分析装置を用いて同一の手法により取得され、蓄積されたデータベース^[16-27]である。電中研ではこれまでに多様な化学成分、照射条件の監視試験片や試験炉照射材の分析を実施しており、国内照射材の溶質原子クラスターに関するデータの蓄積が進んでいる。本項では、電中研においてこれまでに蓄積された国内の原子炉圧力容器鋼材の APT 分析状況について調査した結果を示す。

電中研に導入された APT 分析装置の概要を図 4.2.1-1 に、装置の測定原理を図 4.2.1-2 に示す。また、APT 分析装置を用いた測定やデータ処理に際して留意されている点を図 4.2.1-3 に示す。

次に、代表例として PWR プラントの監視試験片の分析で得られた溶質原子クラスターのデータベース^[16,18-20]について傾向分析を行なった結果を、溶質原子クラスター直径、溶質原子クラスター数密度、溶質原子クラスター体積率及び溶質原子クラスター中の原子組成の順に図 4.2.1-4～9 に示す。まず、溶質原子クラスター直径については、図 4.2.1-4 に示すように照射量の増加に伴い大きくなり、Cu 含有量が高いほど小さくなる傾向がある。また、図 4.2.1-5 に示すように中性子束が高いほど溶質原子クラスター直径が小さくなる傾向がみられる。溶質原子クラスター数密度については、図 4.2.1-6 に示すように照射量の増加及び Cu 含有量の増加に伴い高くなる傾向がある。また、図 4.2.1-7 に示すように特に PWR プラントの照射条件と試験炉の照射条件を比較すると、試験炉(中性子束高)のほうが数密度が高い傾向となっている。溶質原子クラスターの平均体積と溶質原子クラスター数密度の積として表される溶質原子クラスター体積率を、PWR プラントの照射条件について図 4.2.1-8 に示すが、照射量や Cu 含有量に対して単調増加する傾向となっている。また、PWR プラント及び試験炉の照射条件で溶質原子クラスター中の原子組成の違いについて調べた結果^[20]を、特に Cu 原子について図 4.2.1-9 に示すが、溶質原子クラスター中の Cu 原子の数は照射量が増加しても一定の傾向であり、試験炉(高中性子束)よりも PWR プラント(試験炉よりも中性子束が低い)のほうが溶質原子クラスター中の Cu 原子の数が多い傾向にある。

電中研では、これまでに 100 条件以上の国内照射材の溶質原子クラスターに関するデータベースを蓄積しており、引き続きデータベースを拡充していくと共に、データベースの傾向分析結果を踏まえて、脆化予測法の検証・改良に取り組むとしている。

質疑応答では、現行予測法が策定されて以降拡充された新知見としては何があるか質問があり、電中研の委員より、APT で得られた溶質原子クラスター体積率だけでなくその算出に際しての元データとなる溶質原子クラスター直径や溶質原子クラスター数密度の傾向について詳細に分析された点が挙げられるとの回答があった。また、専門家委員より電中研の委員に対して、溶質原子クラスターにのみ着目するのではなく、マトリックス損傷のうち、溶質原子クラスターの生成核にならない転位ループについても、新しい手法、例えば図 4.2.2-4 に示すような微小な転位ループの分析結果を活用することも検討したほうがよいとの提言があった。

□APT:圧力容器鋼中に形成した溶質原子クラスターを定量的に評価できる非常に有用な装置・手法

- LEAP3000XSi
- 測定温度:50K
- パルスモード:電圧パルス
- 試料調製方法:電解研磨法
- 材料:
 - 圧力容器監視試験片(PWRおよびBWR)
 - PWR比較標準材
 - 試験炉照射材(PLIM材^{※1}, PTS材^{※2}, 保管材)



LEAP3000XSi

※1 文献[28]

※2 文献[15]

図 4.2.1-1 電中研に導入された APT 分析装置

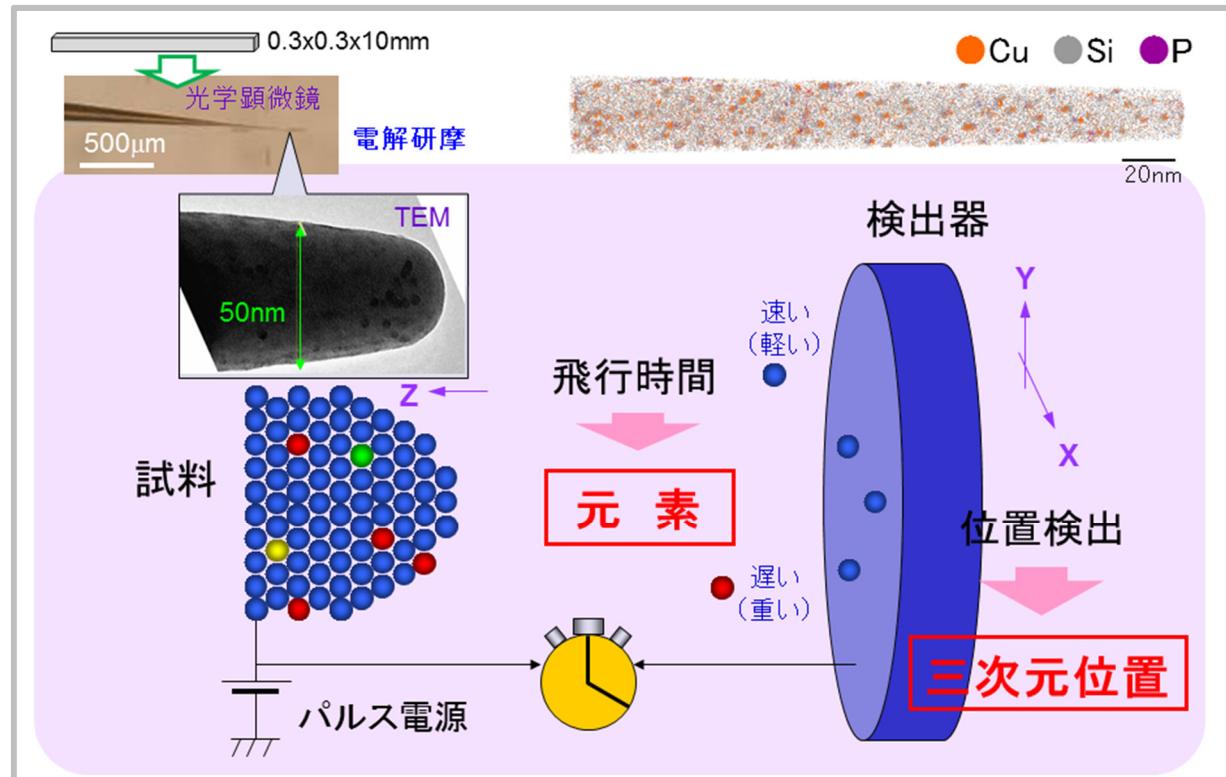


図 4.2.1-2 APT の測定原理

- 統計的に十分な数の測定データが得られるよう、1材料について3チップ以上かつ、検出される溶質原子クラスター数が200個以上、または測定原子数が1億個以上得られるまで測定を継続する。※
- 溶質原子クラスター解析プログラムのバージョンを管理している。
- 毎年装置の保守メンテナンスを実施し、装置のコンディションを常に一定に保つようにしている。

※ 2019 年時点の指針であり、測定実績を踏まえ適宜見直しが行われてきた

図 4.2.1-3 APT 分析に際して電中研で留意されている事項

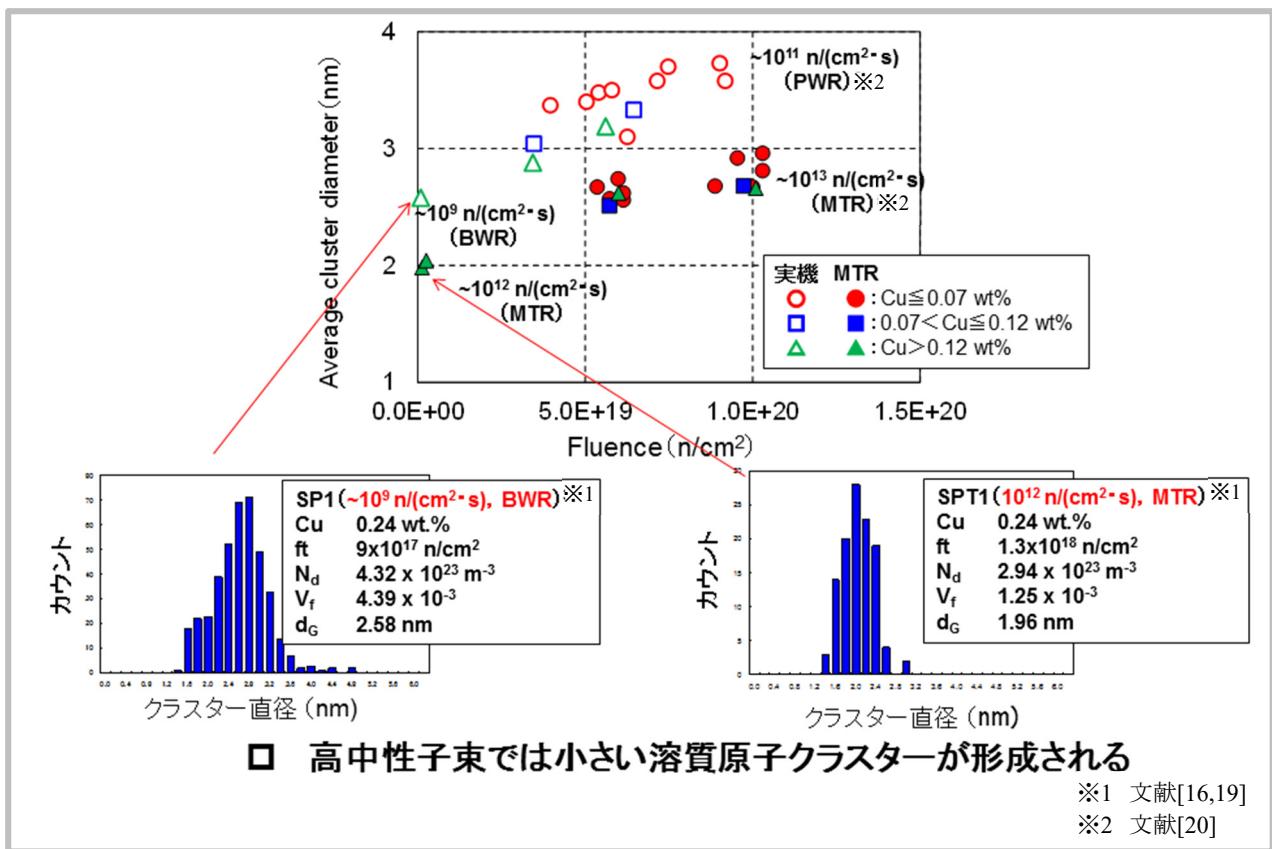
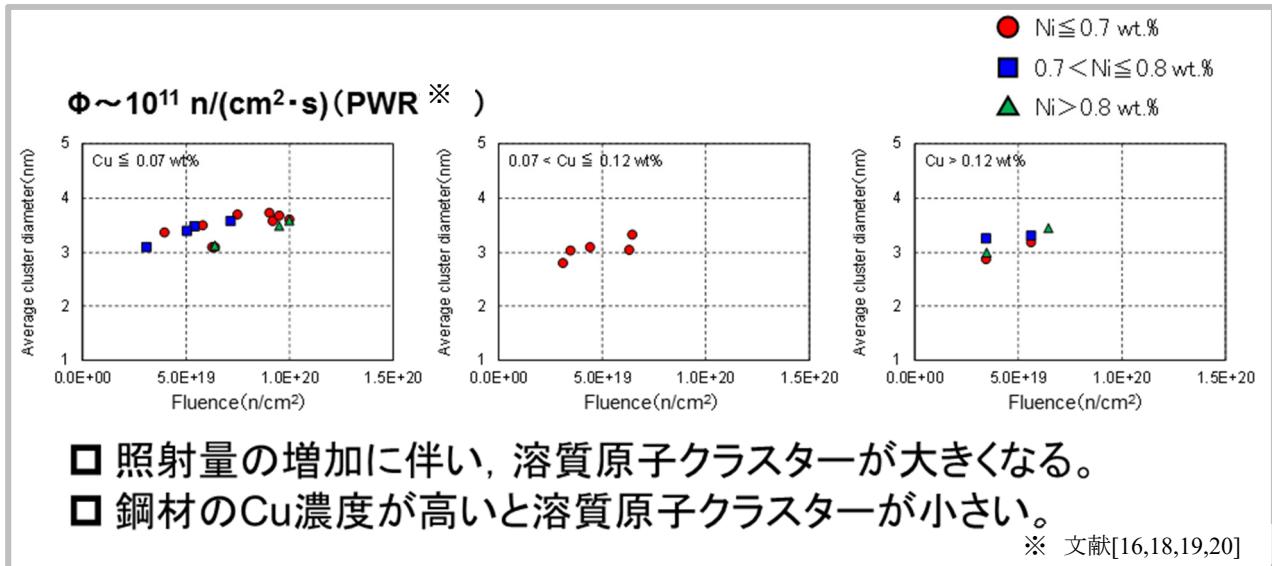
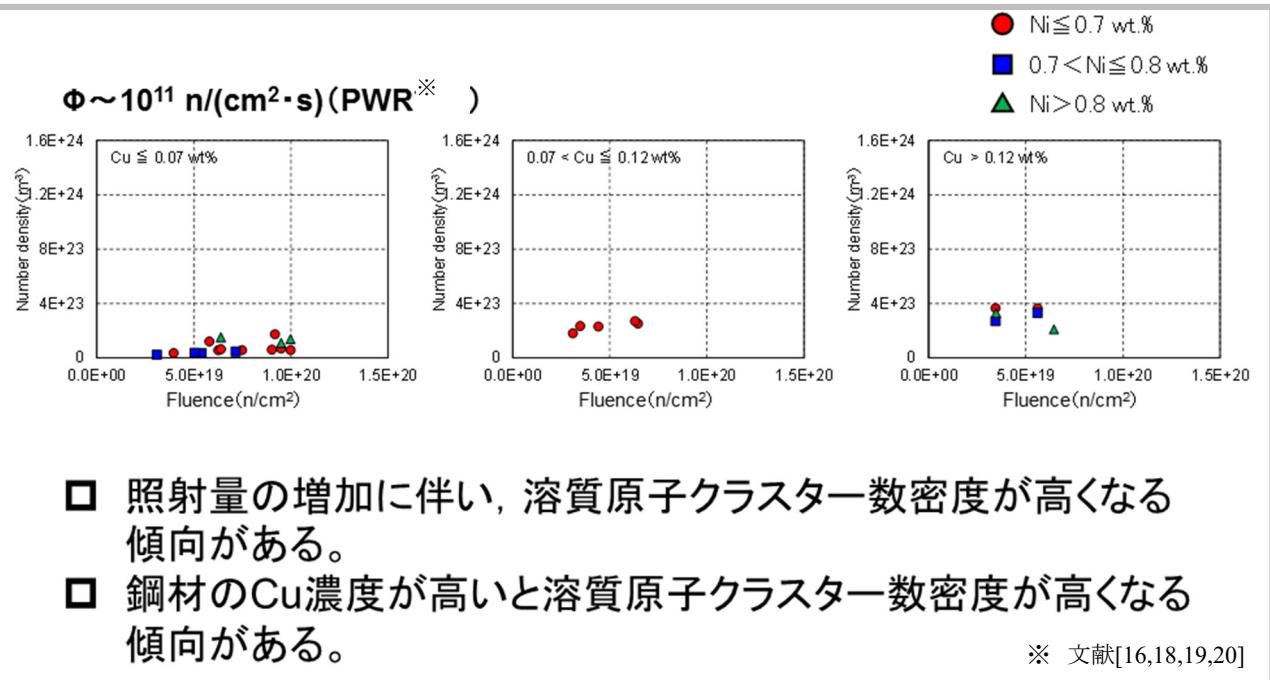
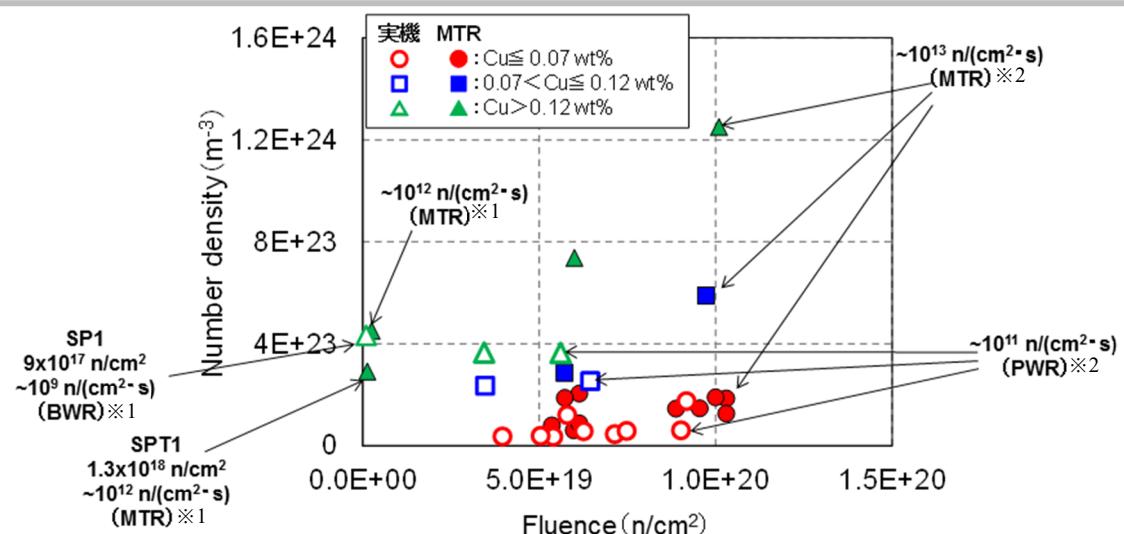


図 4.2.1-5 溶質原子クラスター直径の中性子束依存性



- 照射量の増加に伴い、溶質原子クラスター数密度が高くなる傾向がある。
- 鋼材のCu濃度が高いと溶質原子クラスター数密度が高くなる傾向がある。

図 4.2.1-6 溶質原子クラスター数密度の照射量依存性(PWR 照射条件)



- $\Phi \sim 10^9$ (SP1) と $10^{12} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ (SPT1) の比較：高中性子束では溶質原子クラスター数密度が低い。
- $\Phi \sim 10^{11}$ と $10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の比較：高中性子束では、溶質原子クラスター数密度が高くなる。

図 4.2.1-7 溶質原子クラスター数密度の中性子束依存性

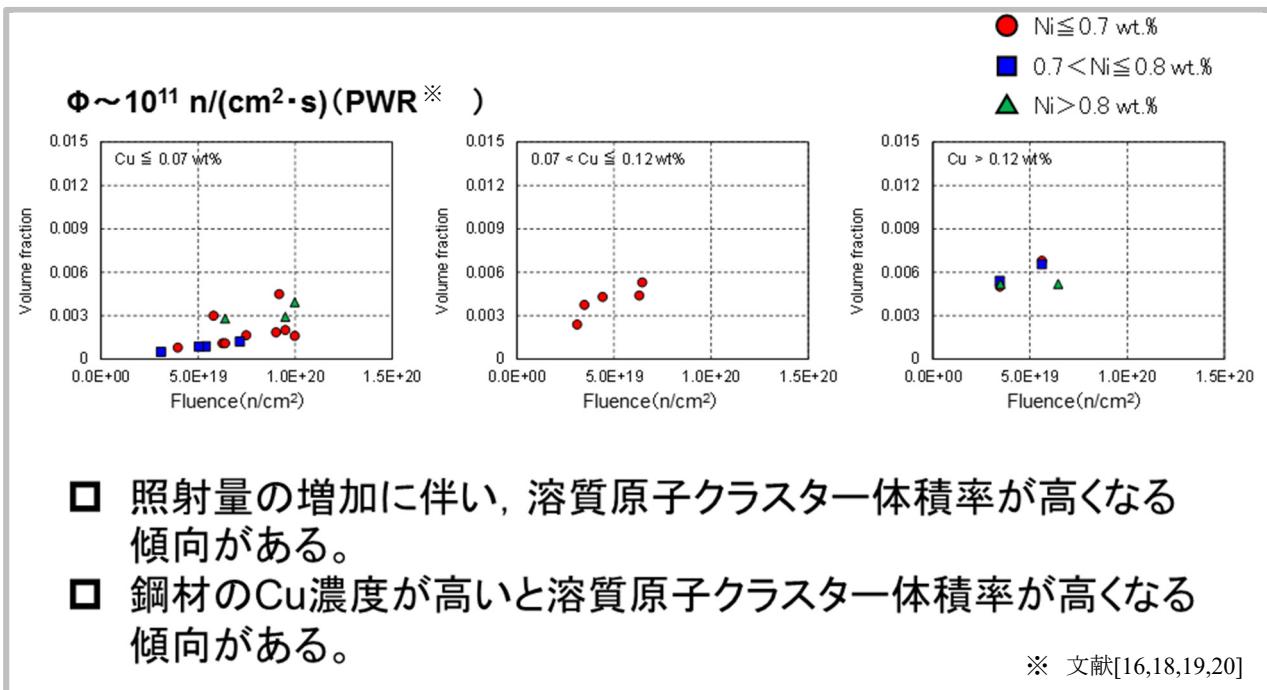
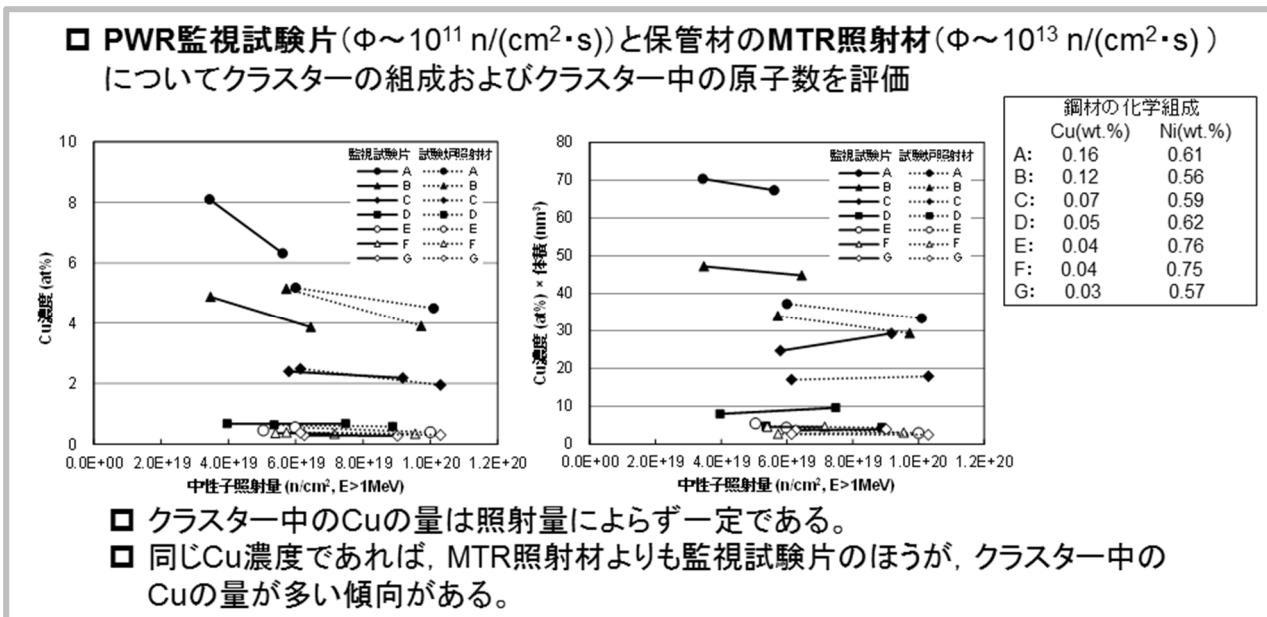


図 4.2.1-8 溶質原子クラスター体積率の照射量依存性(PWR 照射条件)

図 4.2.1-9 溶質原子クラスター中の Cu 原子の照射量、中性子束依存性
(PWR 及び試験炉照射条件)^[20]

4. 2. 2 照射脆化メカニズムに関する研究動向

(1) 東北大学における研究

原子炉圧力容器鋼材を対象とした照射脆化メカニズムに関する研究が東北大学において行われていることから、その研究動向について調査した。

東北大学では、これまでに原子炉圧力容器鋼材を対象とした溶質原子クラスターの照射量依存性に関する検討、欧州 PWR プラントの監視試験片のミクロ組織分析、焼鈍の有無による照射効果の違いに関する検討などが行われている。

溶質原子クラスターの照射量依存性に関しては、試験炉照射材において硬化(ΔH_V)及び溶質原子クラスター数密度の照射量依存性を調べた結果、硬さは比較的低照射量領域で急峻に増加するのに対し、溶質原子クラスター数密度は中程度の照射量領域にならないと増加せず、傾向に一致しない点が見られることから、溶質原子クラスター形成以外の要因で硬化が生じている可能性が示唆される(図 4.2.2-1 参照)^[29]。

欧州 PWR プラントの監視試験片のミクロ組織分析については、Cu 含有量が 0.04wt.% の溶接金属の監視試験片(未照射材及び最大 $1.2 \times 10^{20}[\text{n}/\text{cm}^2, E > 1\text{MeV}]$ までの照射量の異なる 4 条件の照射材)を対象にミクロ組織観察を実施し、ミクロ組織変化の照射量依存性について調べた(鋼材の化学組成、照射条件及び硬さ変化については図 4.2.2-2 参照)^[30]。これらの未照射材及び照射材について WB-STEM 法^{[31]注 20)}(手法の概要については図 4.2.2-3 参照)により転位ループを観察した結果、図 4.2.2-4 に示すように特に $8.2 \times 10^{19}[\text{n}/\text{cm}^2, E > 1\text{MeV}]$ 以上の照射材では転位ループの数密度が増加して $10^{22}[\text{m}^{-3}]$ を上回った^[30]。WB-STEM 法により得られた転位ループの数密度に基づき Orowan モデルで ΔH_V を試算した結果、図 4.2.2-5 に示すように照射量と共に単調増加し、特に $8.2 \times 10^{19}[\text{n}/\text{cm}^2, E > 1\text{MeV}]$ 以上の照射材では転位ループによる硬化が一定程度寄与していることが示唆された^[30]。また、これらの照射材について APT 分析により得られた溶質原子クラスター体積率から Russell-Brown モデルにより ΔH_V を試算した結果、図 4.2.2-6 に示すように照射量が $3.4 \times 10^{19}[\text{n}/\text{cm}^2, E > 1\text{MeV}]$ 以上の照射材では溶質原子クラスターの硬化への寄与が認められたが、照射量が $1.3 \times 10^{19}[\text{n}/\text{cm}^2, E > 1\text{MeV}]$ の照射材の硬化は WB-STEM 法で観察された転位ループや APT で観察された溶質原子クラスター以外の要因により生じている可能性が示唆された^[30]。また、同一の領域を WB-STEM 法及び APT により観察した結果、転位ループと溶質原子クラスターが同一位置に存在し、複合体を形成していることが確認された(図 4.2.2-7 参照)。

焼鈍の有無による照射効果の違いに関しては、VVER 型炉の照射後の監視試験片を焼鈍した後に再照射し、溶質原子クラスターの形成状況を調査した結果、焼鈍後再照射した場合は未照射材を照射する場合と比べて溶質原子クラスター体積率が小さく、焼鈍後再照射した場合は溶質原子クラスターの形成・成長とは異なる要因により硬さ上昇が生じている可能性が示唆された(図 4.2.2-8 参照)^[32,33]。

これらの検討を踏まえ、東北大学の委員より最近の照射脆化メカニズムに関する研究では APT 分析により得られる溶質原子クラスターに着目した研究が主流となっているが、TEM^{注 21)}

^{注 20)} ウィークビーム走査透過電子顕微鏡法(Weak-Beam Scanning Transmission Electron Microscopy)の略称。

^{注 21)} 透過電子顕微鏡法(Transmission Electron Microscopy)の略称。

や WB-STEM 法により観察される転位ループなどの溶質原子クラスター以外の照射脆化因子についても着目すべきと総括された。

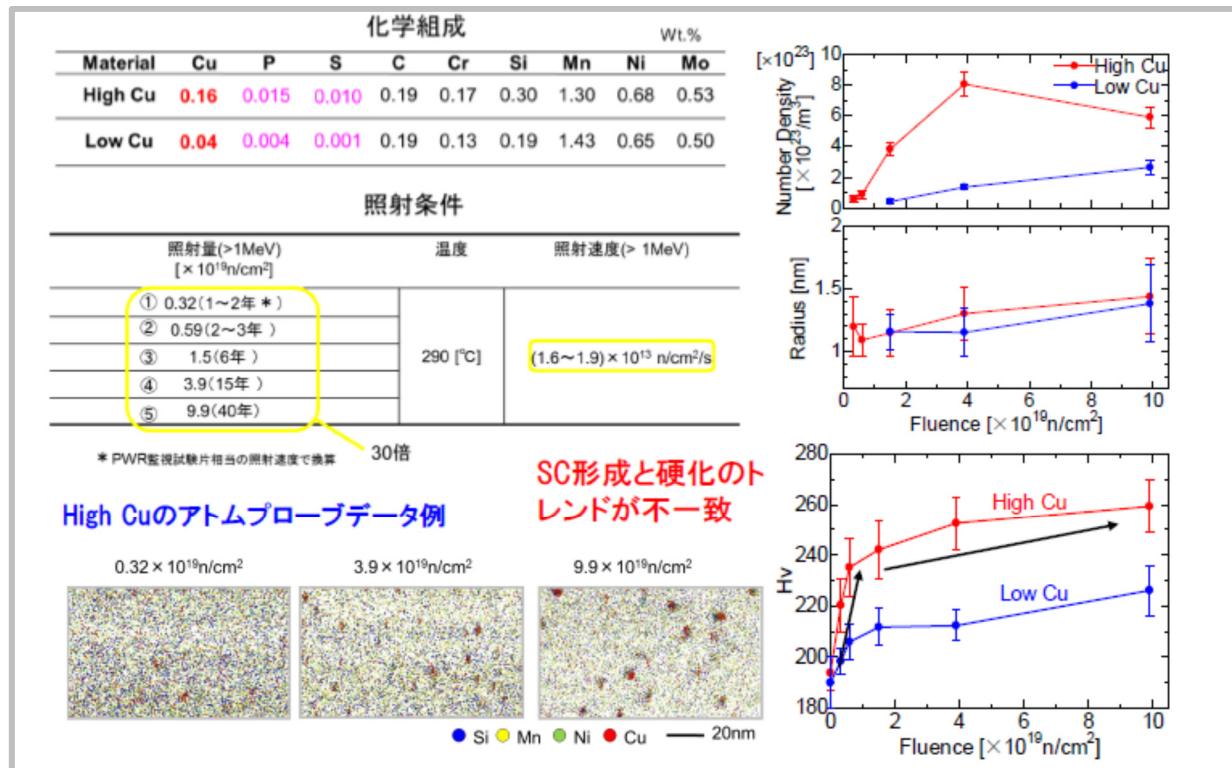


図 4.2.2-1(1/2) 試験炉照射材によるミクロ組織分析結果の照射量依存性の例(1/2)^[29]

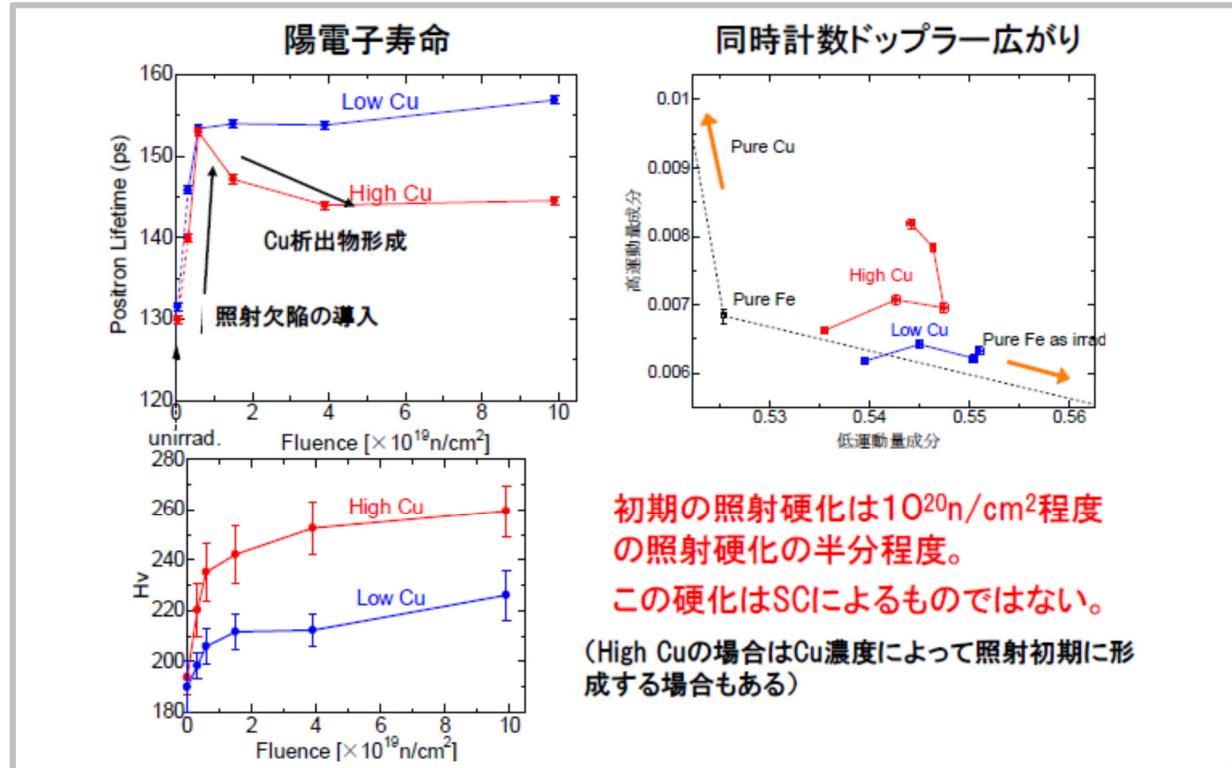
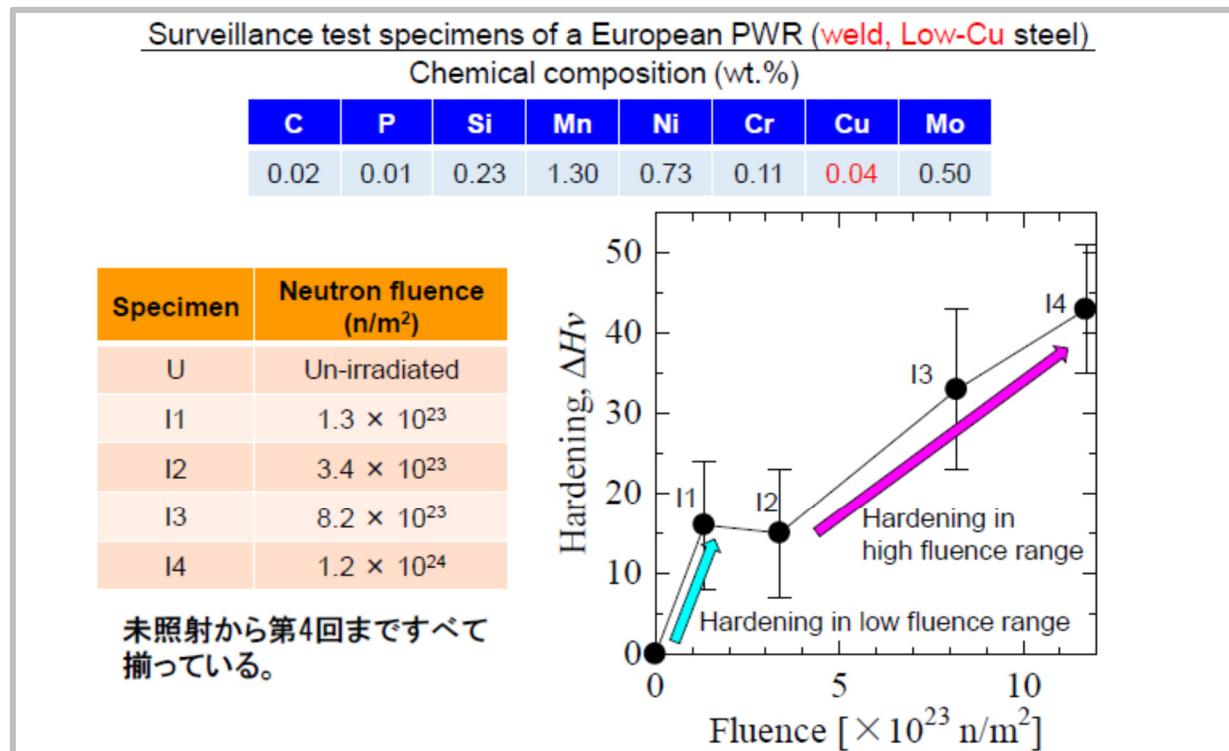
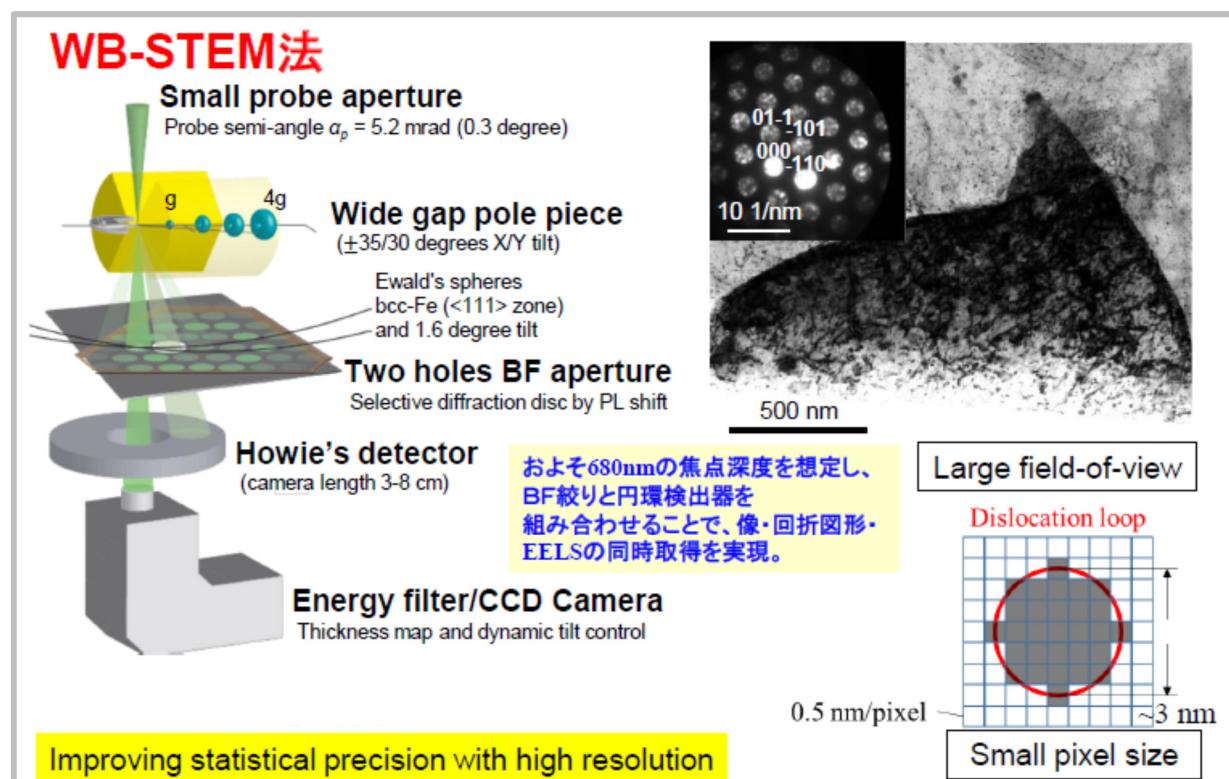
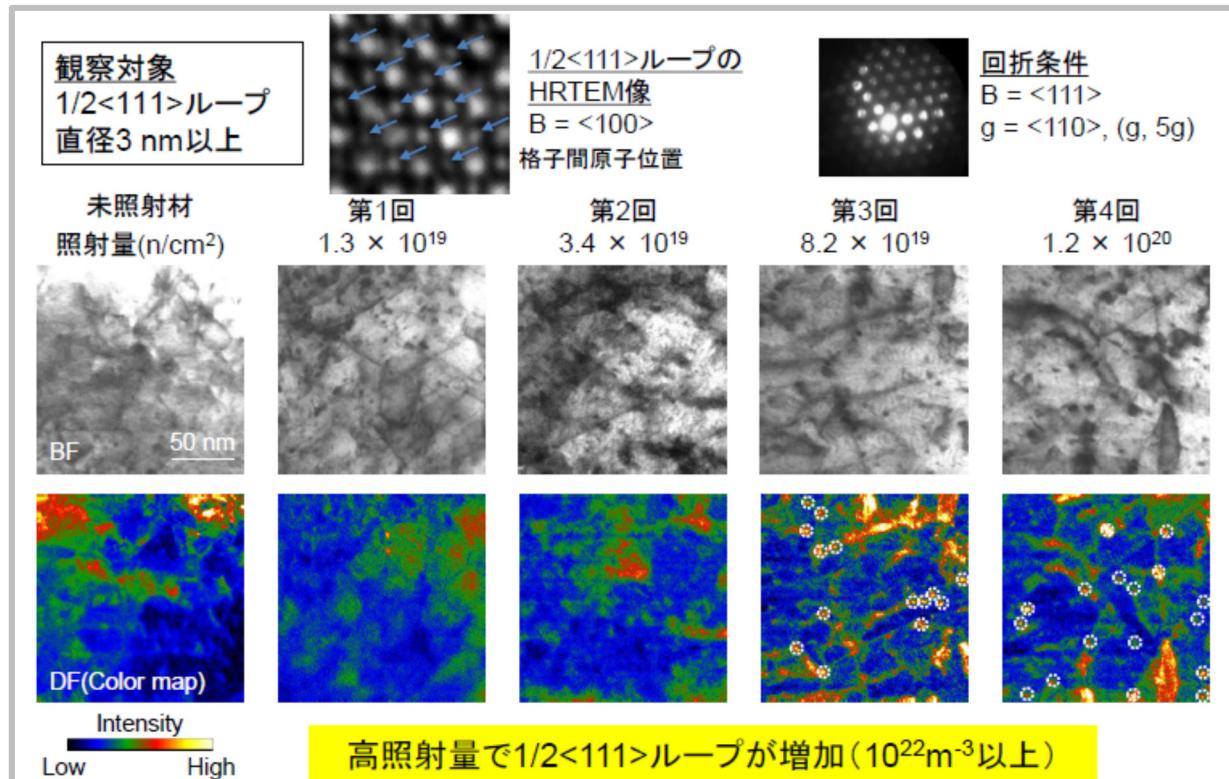
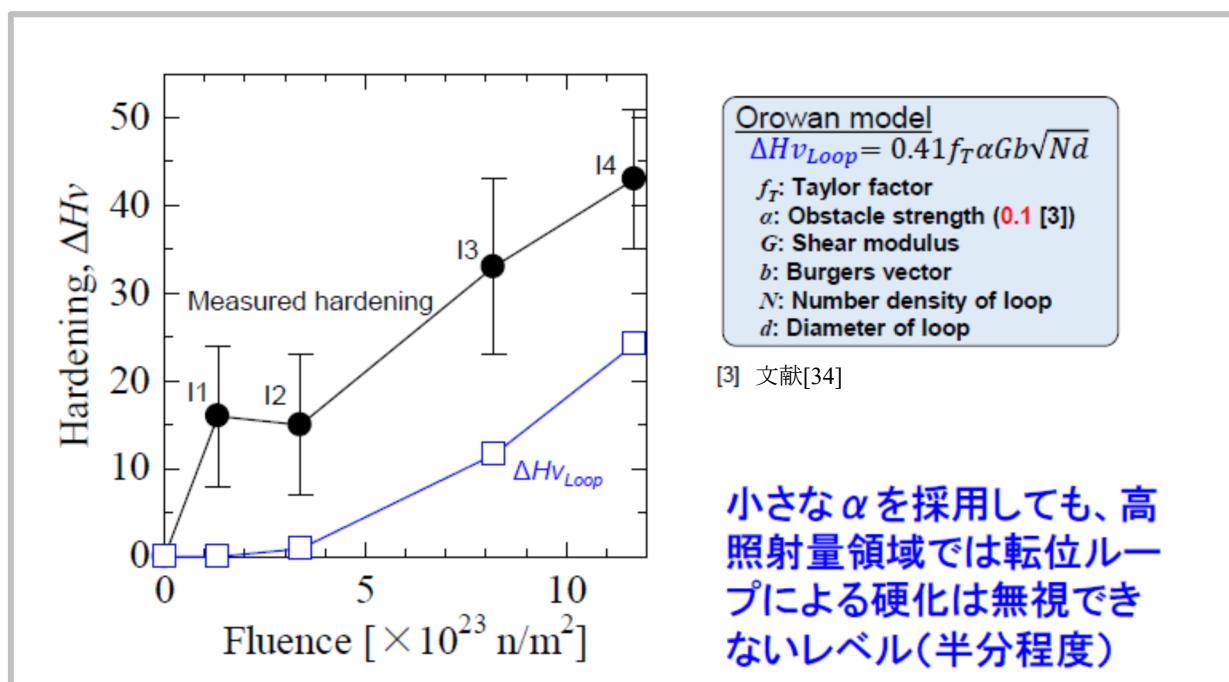


図 4.2.2-1(2/2) 試験炉照射材によるミクロ組織分析結果の照射量依存性の例(2/2)^[29]

図 4.2.2-2 分析対象試験片の化学組成、照射条件及び硬さ変化^[30]図 4.2.2-3 WB-STEM 法の概要^[31]

図 4.2.2-4 WB-STEM 法による転位ループの観察結果^[30]図 4.2.2-5 転位ループによる硬さ上昇量の試算結果^[30]

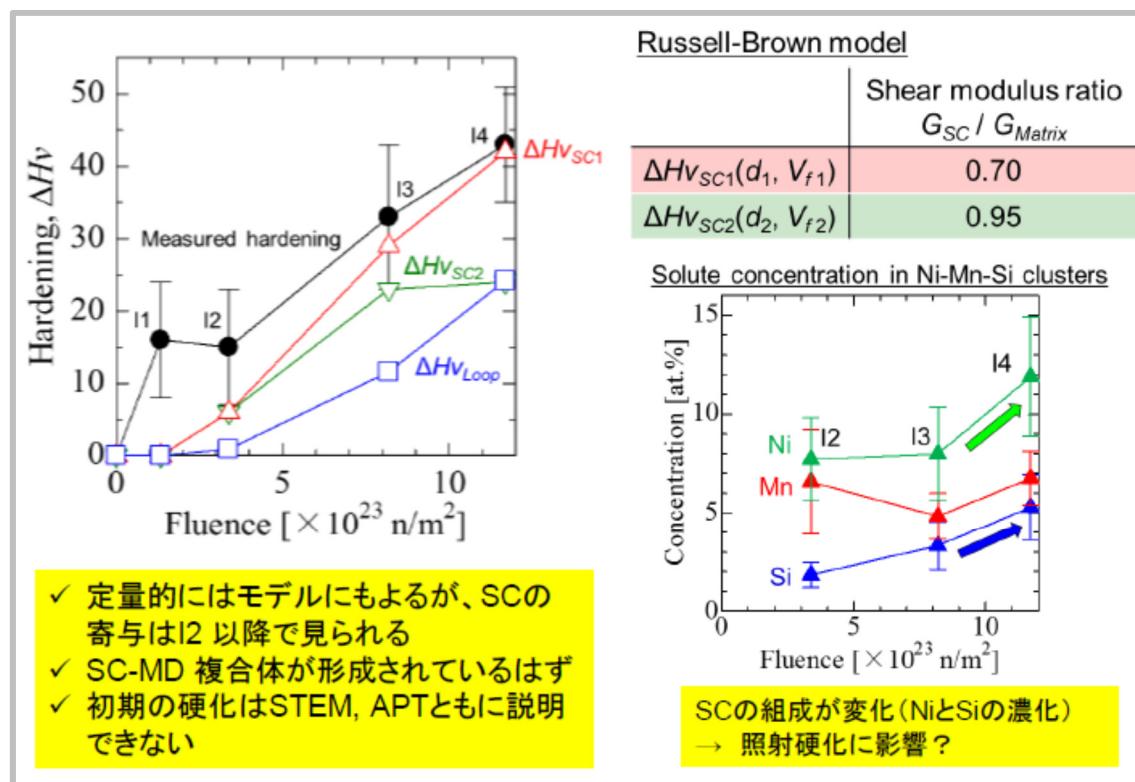
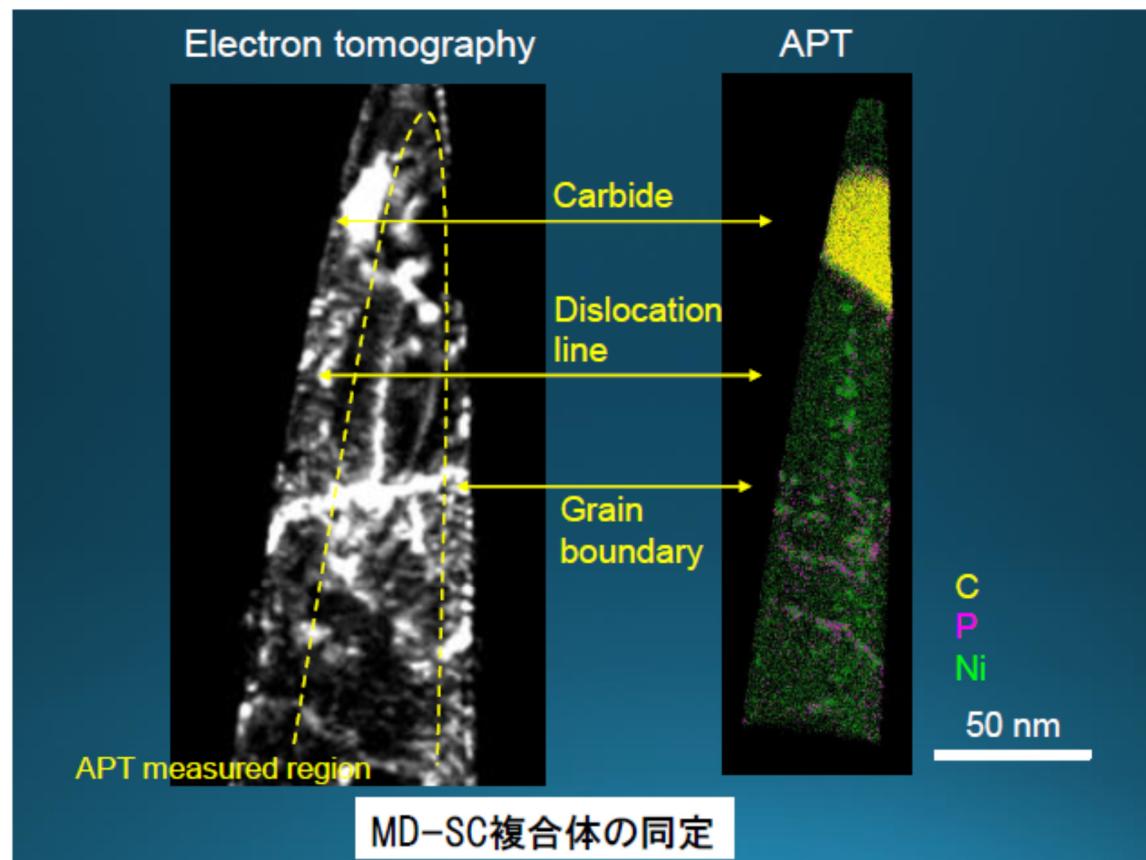
図 4.2.2-6 溶質原子クラスターと転位ループの硬さ上昇への寄与^[30]

図 4.2.2-7 TEM と APT による同一領域の観察結果

フィンランド Loviisa炉 監視試験片

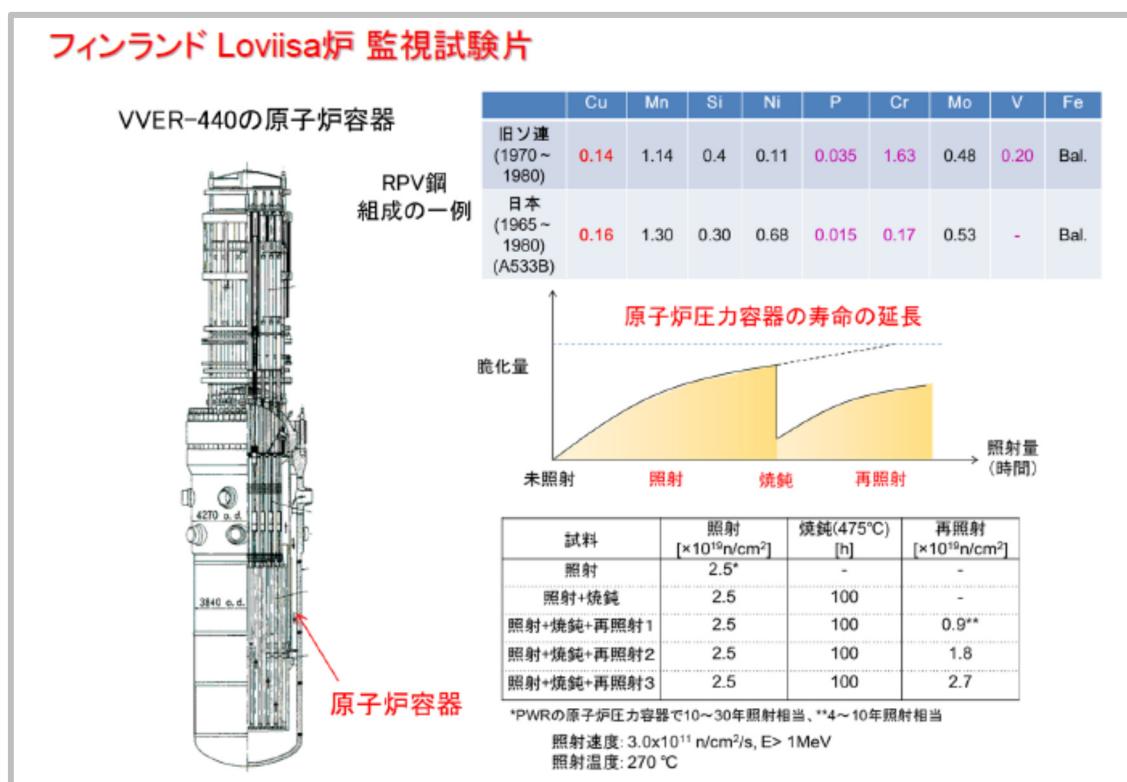


図 4.2.2-8(1/2) 焼純の有無による溶質原子クラスター形成と硬化の関係(1/2)^[32]

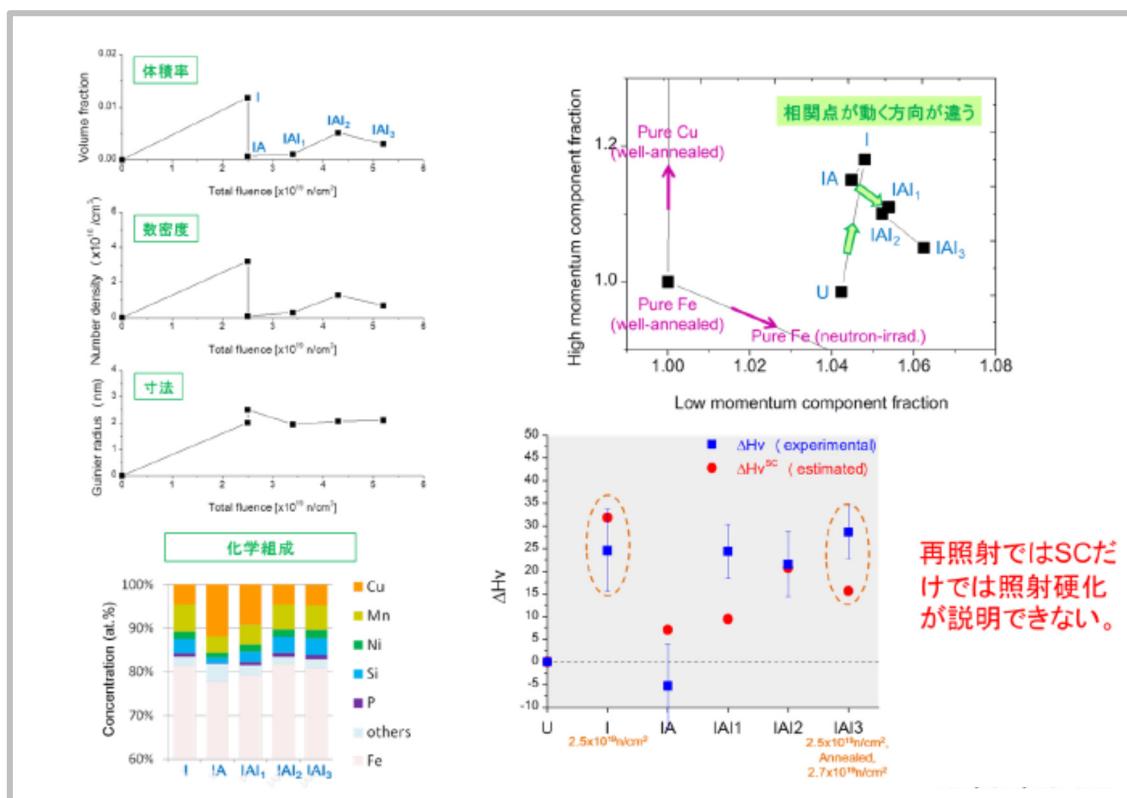


図 4.2.2-8(2/2) 焼純の有無による溶質原子クラスター形成と硬化の関係(2/2)^[32,33]

(2) 京都大学における研究

原子炉圧力容器鋼材を対象とした照射脆化メカニズムに関する研究が京都大学において行われていることから、その研究動向について調査した。

京都大学では、これまでに原子炉圧力容器鋼材を対象として、プラントが高経年化することで顕在化する課題(図 4.2.2-9 参照)として、特に現行予測法ではパラメータとしていない Mn の照射影響(図 4.2.2-10 参照)に関する検討及び監視試験片の不足に備えたサブサイズ試験片を活用した衝撃試験技術の開発が行われている。

a. Mn の照射影響に関する研究動向

二元系モデル合金(Fe-1at.%X: X=Cu, Mn, Ni, Mo, Cr)及び純鉄を、照射温度 290°Cで異なる照射量($5.3, 6.2, 9.1 \times 10^{19}$ [n/cm², E>1MeV])まで試験炉照射し、照射硬化挙動の合金元素依存性を調べた結果、Fe-Cu 合金及び Fe-Mn 合金は、純鉄や他の合金に比べ顕著な照射硬化を示した(図 4.2.2-11 参照)^[35]。照射量依存性に着目すると、Fe-Cu 合金においては、照射硬化が比較的低い照射量(5.3×10^{19} [n/cm², E>1MeV])で飽和する傾向を示すが、Fe-Mn 合金では 9.1×10^{19} n/cm²まで徐々に増大した(図 4.2.2-12 参照)^[35,36]。また、Mn の含有量に着目すると、Mn 含有量が 0.5 wt.%では顕著な照射硬化は見られないが、1.0 wt.%及び 1.5 wt.%では、照射量が $0.65 \sim 1.0 \times 10^{20}$ [n/cm², E>1MeV] の高照射量領域で顕著な照射硬化が認められた(図 4.2.2-13 参照)^[36]。

Mn が顕著な照射影響を示した要因としては、Mn 原子を起点とする転位ループあるいは空孔型照射欠陥等のマトリックス損傷が考えられる^[37,38]。Mn の照射影響に関して得られた知見を図 4.2.2-14 に示す。今後、原子炉圧力容器鋼材における Mn の照射影響を明らかにするためには、ベイナイト組織の影響や溶質原子が多様(Mn,Ni,Si,Mo)であることの影響を調べる必要がある。

また、照射速度依存性に関する現状知見を整理した結果を図 4.2.2-15 に示す。京都大学の委員より、JMTR の試験炉照射データの知見から、低Cu材においては照射速度依存性はないとされており、Mn の照射影響はマトリックス損傷が中心となることを踏まえると、試験炉照射に基づく知見であっても、商用炉における今後の顕在化に備えて研究を進める必要があると総括された(図 4.2.2-16 参照)。

質疑応答では、Mn の照射影響に関して、Fe-Mn のモデル合金でも溶質原子クラスターの形成は認められるのではないかとの質問があつたが、当該の試料については当時 APT で観察しておらず京都大学では確認できていないが、仮に溶質原子の析出が認められたとしても転位ループに析出しているのであり、マトリックス損傷として捉えるべきと理解しているとの回答があつた。また、電中研の委員より、仮にモデル合金において Mn 含有量の違いにより照射影響に違いが見られたとしても、原子炉圧力容器鋼材では炭化物への Mn の析出も見られることから、考慮すべき Mn 含有量の範囲は材料規格上の化学組成の範囲よりも狭い可能性があるとの指摘があつた。これに対し、京都大学の委員より、Mn 含有量が 1wt.%程度であれば、Mn を含むフェライトにおいては、ある照射量以上で照射影響が急に発現する可能性があるということを認識しておくことが重要であり、その臨界となる照射量や Mn 含有量等を明

らかにすることが重要であるとの回答があった。また、京都大学の委員より、既存の機構論に基づいて統計的に予測残差を小さくすることも重要ではあるが、低照射量領域において妥当とされる照射脆化機構が高照射量領域においても妥当であるかを見極めることが、高経年炉においては一層重要であるとの指摘があった。

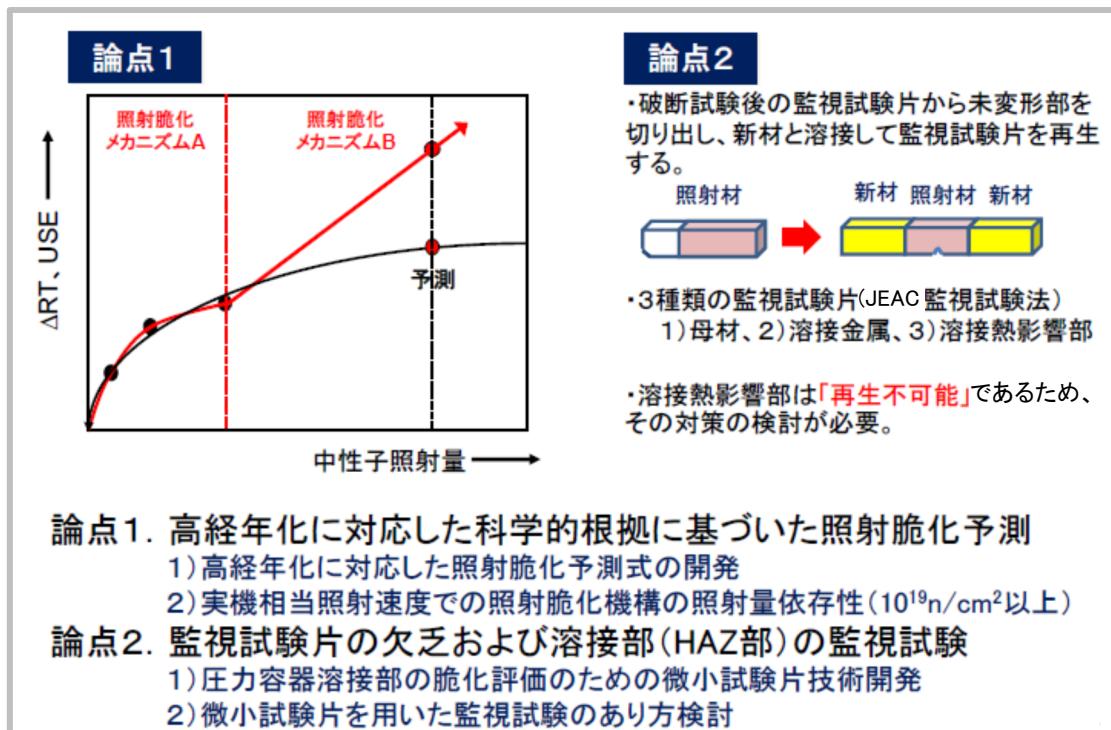


図 4.2.2-9 プラントの高経年化に伴い顕在化する課題

- 軽水炉の高経年化に伴い、
- 圧力容器が被る照射損傷量は、これまで未知の領域に踏み込む。
 - 高照射損傷量の影響は、材料試験炉等を用いた加速試験で得られている。
 - 照射脆化の損傷速度依存性を示す科学的根拠が求められている。

1. A533B鋼

成分	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	P	S
wt%	<0.25	0.15-0.30	1.15-1.50	0.40-0.70	0.45-0.60	<0.12	<0.015	<0.018

2. 圧力容器の照射脆化予測式 (JEAC 4201-2004 : 付録)

$$\Delta RT_{NDT} = [CF] \cdot f^{0.29-0.04 \log f}$$

$$[CF] = -16 + 1210 \cdot P + 215 \cdot Cu + 77 \sqrt{Cu \cdot Ni}$$

$$\Delta RT_{NDT} = [CF] \cdot f^{0.25-0.10 \log f}$$

$$[CF] = 26 - 24 \cdot Si - 61 \cdot Ni + 301 \sqrt{Cu \cdot Ni}$$

Mnの影響は加味されていない。
(実機のMn量は0.5~1.6%の範囲)

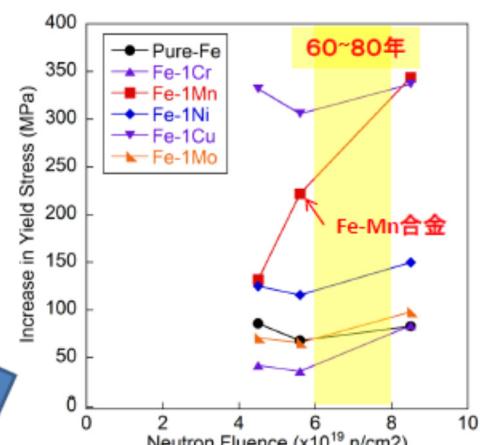
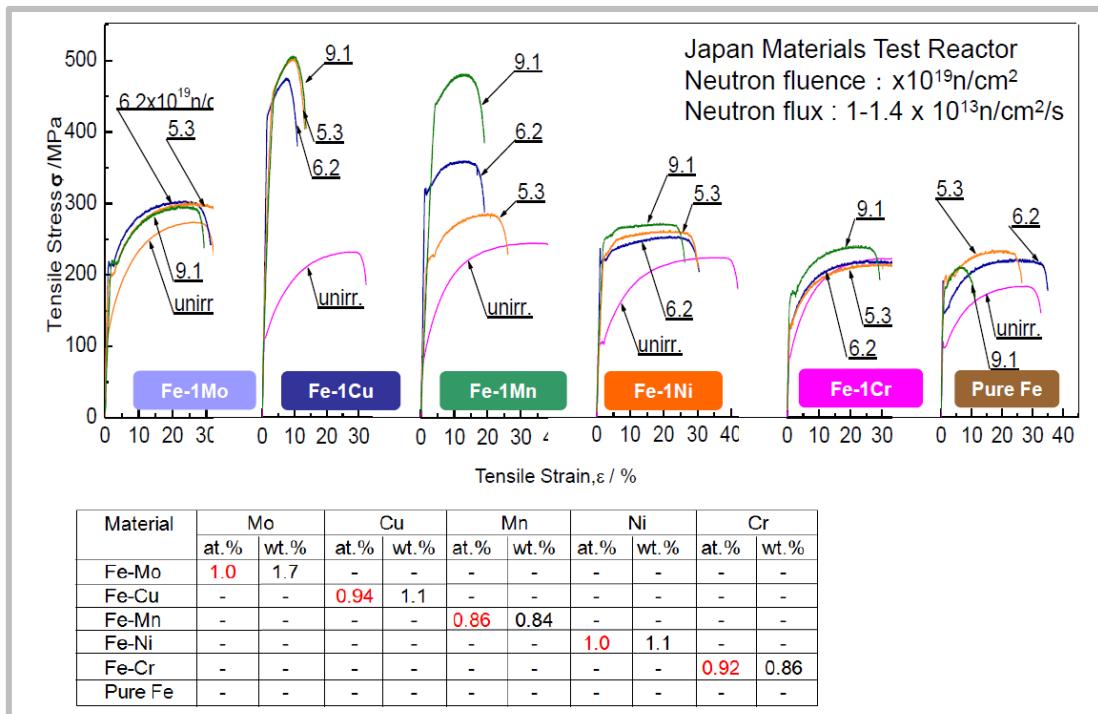
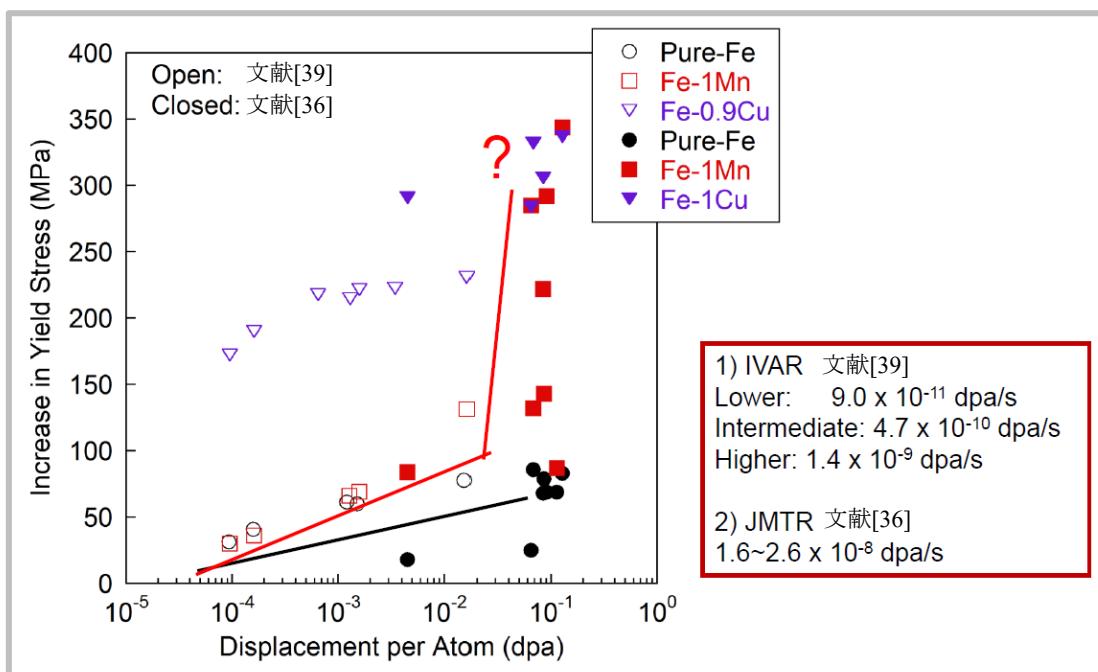
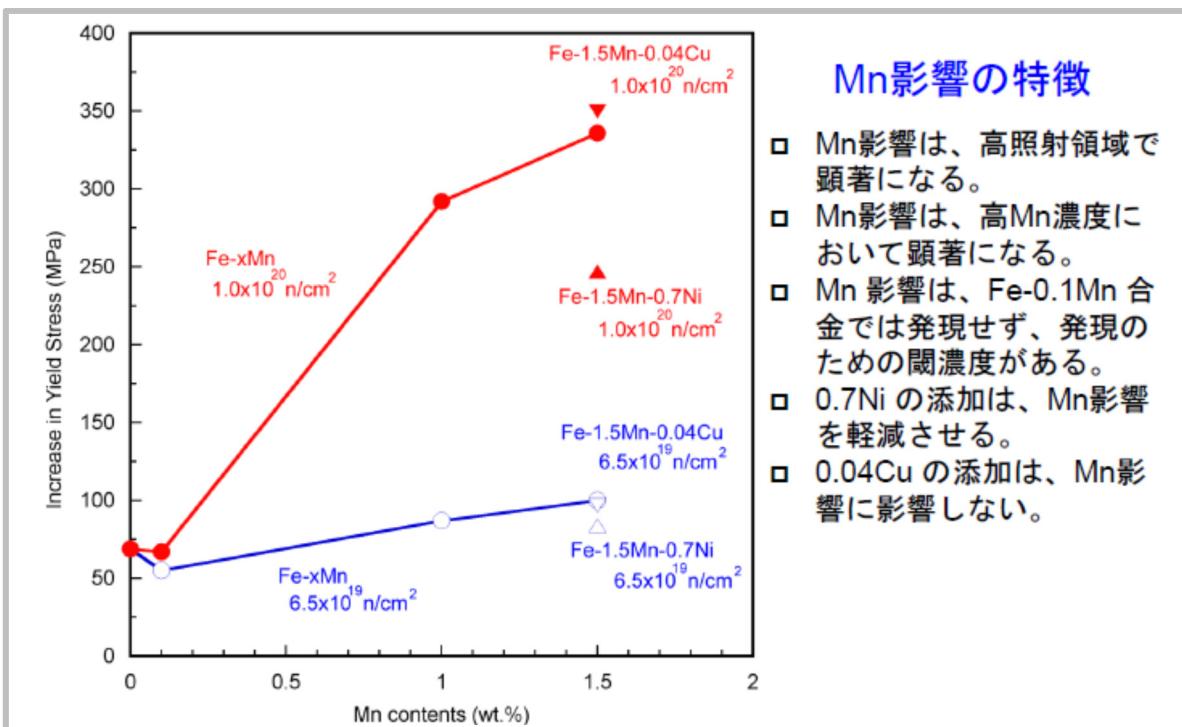


図 4.2.2-10 高照射量領域における Mn の照射影響

図 4.2.2-11 照射硬化挙動に関する合金元素依存性^[35]図 4.2.2-12 Fe-Mn 合金, Fe-Cu 合金及び純鉄の照射影響の違い^[35,36]

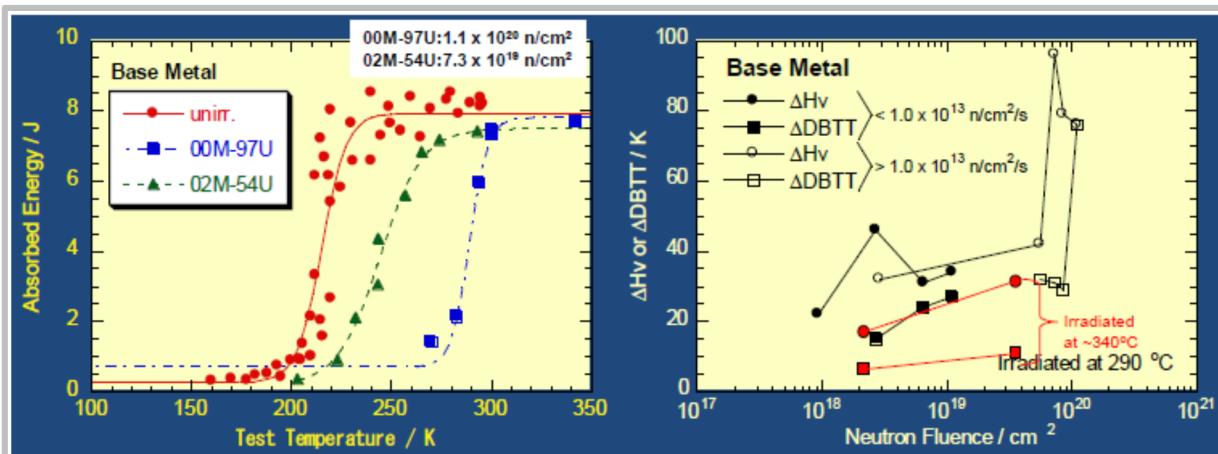
図 4.2.2-13 照射影響に関する Mn 含有量依存性^[36]

1. 顕著な照射硬化が伴う組織変化
 - 1) 高密度の微小な転位ループの形成
 - 2) 単空孔 (Mn-V対) の形成
2. 顕著な照射硬化の支配因子
 - 1) 高密度の微小な転位ループ
 - 2) Mn(O) の偏析による強度因子の増大
3. Mn による空孔の捕獲
 - 1) Mn は空孔を捕獲し、格子間原子やその集合体との再結合による対消滅を抑制し、自由欠陥濃度の上昇に寄与する。

【提案】 Mn は、転位ループの b ベクトルを $a/2<111>$ から $a<100>$ へと変える役割を果たしている。

- ◆圧力容器鋼への適用における問題点
- 1) ベイナイト組織の影響
 - 2) 溶質原子の多様性 (Mn, Ni, Si, Mo)

図 4.2.2-14 Mn の照射影響に関する現状知見



- 低Cu-RPVSは損傷速度依存性を示さない傾向
- 損傷速度依存性はCRPによる硬化に発現している。一方、Matrix-Defect (MD)の照射硬化に損傷速度依存性はないといわれている。
- $6 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 以上で顕著な損傷量依存性(損傷速度依存性?)
- $10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ (for $E > 1.0 \text{ MeV}$ at 290°C)を超えるとUMDが形成されて、損傷速度依存性が発現するとも言われている。

図 4.2.2-15 照射速度依存性に関する現状知見^{注22)}

高経年化に対応した科学的根拠に基づいた照射脆化予測 ⇒ Mn影響について

- 1) 高経年化に対応した照射脆化予測式の開発
- 2) 実機相当照射速度での照射脆化機構の照射量依存性
(10^{19} n/cm^2 以上)

- 国内のRPVSのMn添加量の相違は1.15%から1.5%の範囲であり、この範囲におけるMnの添加量の相違によるRTやUSEに顕著な差は生じないであろう。
- Mn影響はマトリックス損傷に係わる現象のため、低損傷量においては低損傷速度においてもMn影響が軽減されることはない。
- しかし、Mn影響はある条件において高照射量領域で発現するのは明らかであり、硬化機構がCRPとは異なるため、硬化(脆化)予測においては予断を許さない。

図 4.2.2-16 高照射量領域に対応した脆化予測モデル開発の必要性

^{注22)} 図中の右側のグラフ縦軸の「 $\Delta DBTT$ 」は、延性-脆性遷移温度の移行量を意味する。算出方法は注23)参照。

b. サブサイズ試験片による衝撃試験技術の開発動向

サブサイズ試験片による衝撃試験技術については、特に標準サイズの衝撃試験片への再生が困難な溶接熱影響部(以下、HAZ)において有効な手段となることから、図 4.2.2-17 に示すような複数の縮小率のサブサイズ試験片を製作して衝撃試験が行なわれた。それぞれのサブサイズ試験片による DBTT^{注23)}を整理して図 4.2.2-18 に示す。標準サイズの衝撃試験片による DBTT とサブサイズ試験片による DBTT との間には線形の相関が認められ^[40,41]、サブサイズ試験片の DBTT から標準サイズの衝撃試験片の DBTT を推定できる見通しが得られた。

また、HAZ における採取位置(ノッチ先端が溶接境界から 1mm 及び 4mm となる位置)の違い並びに母材部との DBTT の違いを調べた結果、図 4.2.2-19 に示すように低 P 材(含有量は 0.003wt.%)では、4mm 位置の DBTT は 1mm 位置よりも高く母材部と同程度であったのに対し、高 P 材(含有量は 0.3wt.%)では、1mm 位置の DBTT が 4mm 位置や母材部よりも高い結果となった^[40]。次に、試験炉照射材を対象に、サブサイズ試験片(1.5mm サイズ)を用いて溶接部、HAZ(1mm 及び 4mm 位置)及び母材部における照射前後の DBTT の分布を調べた結果、図 4.2.2-20 に示すように位置により Δ DBTT が異なり、HAZ の Δ DBTT は母材部よりも若干大きいものの、1mm 位置(HAZ 監視試験片の標準の採取位置)の照射後の DBTT は母材部よりも低い結果となつた^[42]。

以上、サブサイズ試験片による衝撃試験技術の開発について得られた知見を図 4.2.2-21 に示す。

a.及び b.の検討により得られた知見を踏まえて、京都大学の委員より、今後のプラントの高経年化に対応して、脆化予測については高照射量領域における Mn の照射影響の発現に備えてそれに対応した予測式を検討しておく必要があること、監視試験については特に HAZ の監視試験にサブサイズ試験片を用いた衝撃試験技術が有効となるとの提言があった。これらの提言事項を模式図に整理して図 4.2.2-22 に示す。

^{注23)} 延性-脆性遷移温度(Ductile – Brittle Transition Temperature)を意味する略語であるが、ここでは衝撃試験結果の平均の遷移曲線において上部棚吸収エネルギーと下部棚吸収エネルギーの平均の吸収エネルギーを示す温度として算出される。

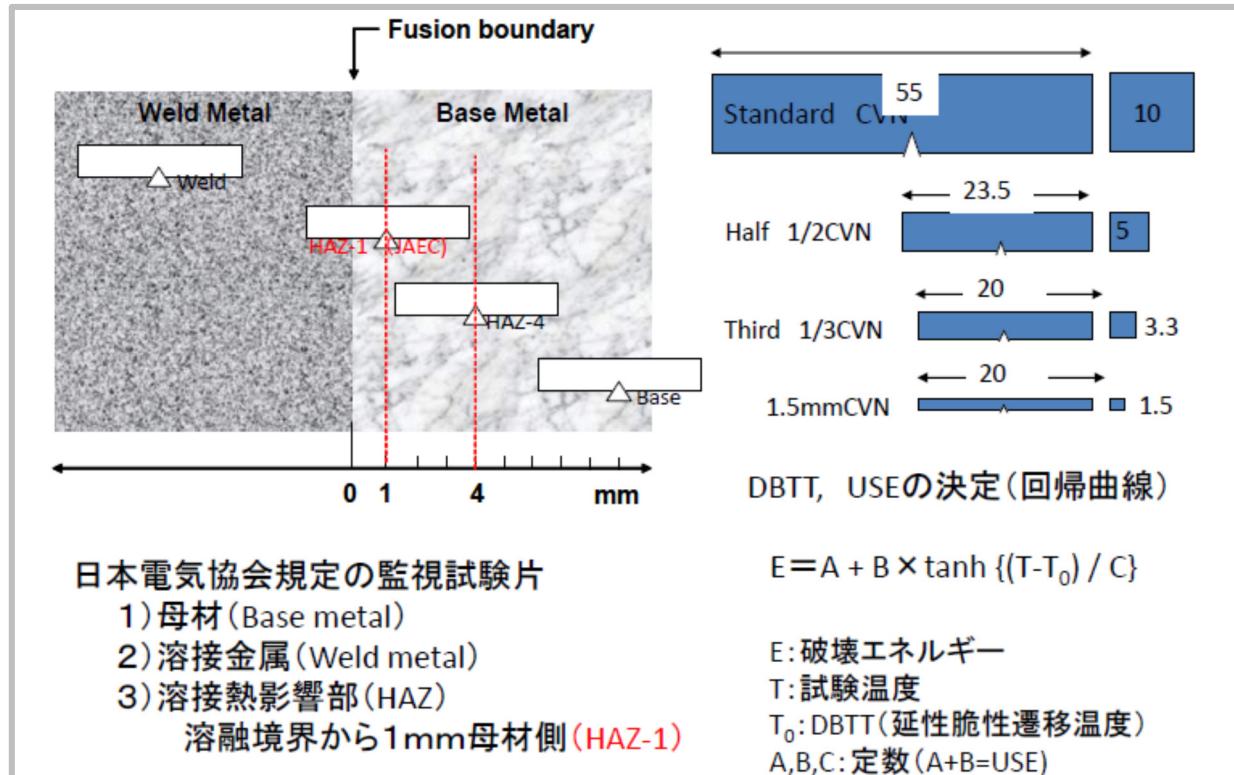
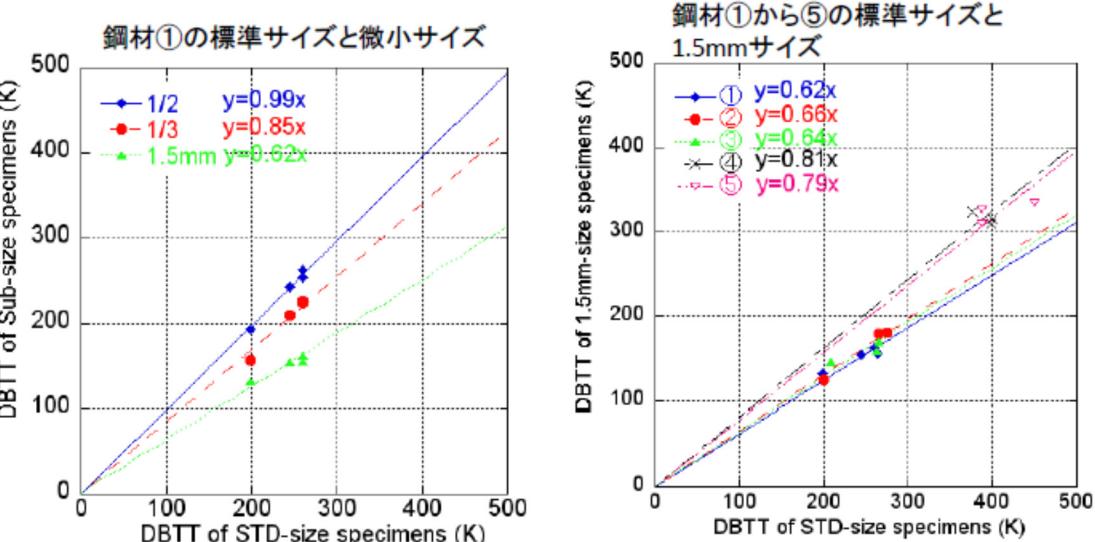


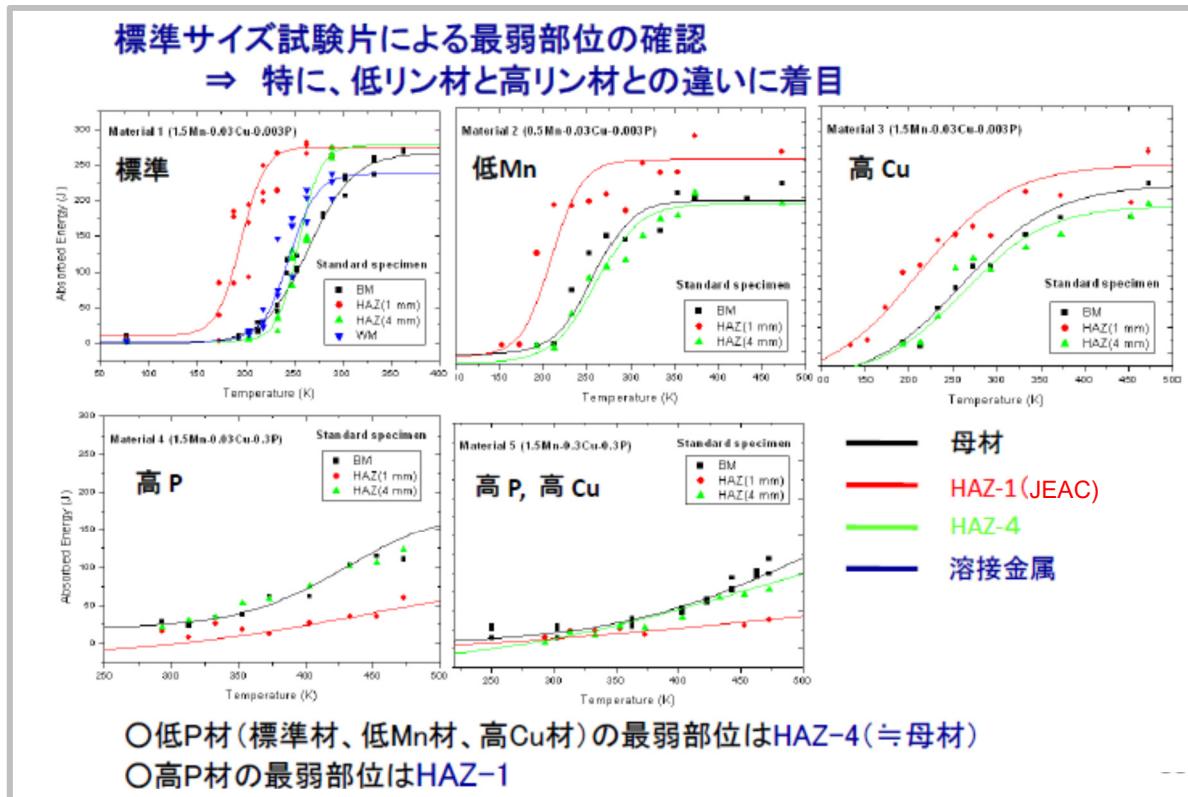
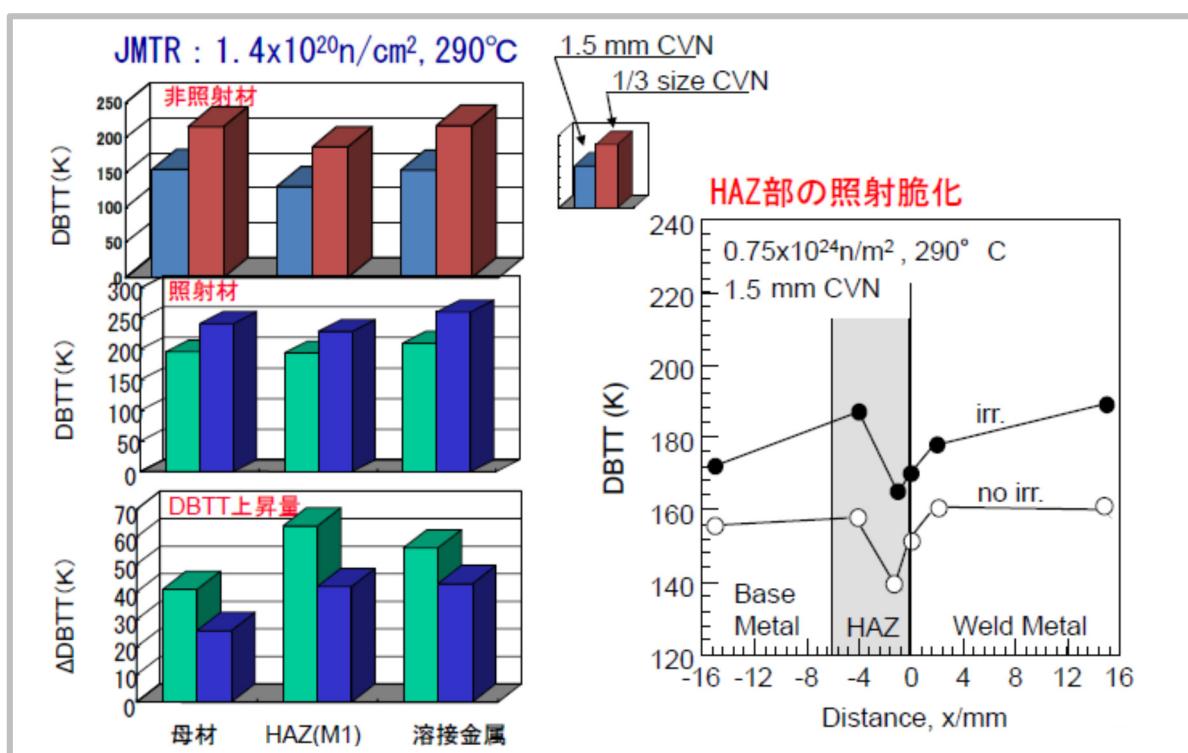
図 4.2.2-17 標準サイズの衝撃試験片及びサブサイズ試験片の採取位置と寸法



○微小試験片と標準試験片のDBTTの間には比例関係(試験片サイズまたは試験片材料に依存)があり、相関付けができる。

図 4.2.2-18 標準サイズの衝撃試験片及びサブサイズ試験片により得られた DBTT の相関^{[40,41]注 24)}

注 24) 図中のグラフ縦軸の「DBTT」は、延性-脆性遷移温度を意味する。算出方法は注 23)参照。

図 4.2.2-19 HAZ(1mm, 4mm 位置)における衝撃試験結果の違い(未照射材)^[40]図 4.2.2-20 母材から溶接金属における照射前後の遷移温度(DBTT)の分布^[42]

○監視試験の精度

①照射前の材料間の相違

- 1) 試験片サイズに依存しない
- 2) $\Delta RT(NDT)$ (関連温度の移行量) の誤差: 母材 $6^{\circ}C$ (1/3サイズ)
- 3) USE (変化率) の誤差: 母材 -9% (1/3サイズ)

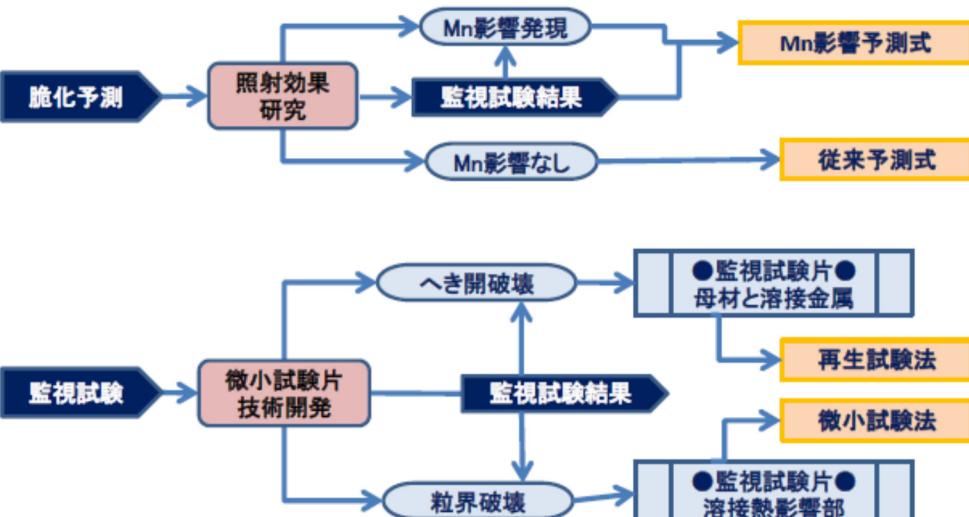
②溶接部位間の相違 (M1)

- 1) 試験片サイズに依存しない
- 2) $\Delta RT(NDT)$ (関連温度の移行量) の誤差: M1材 $12^{\circ}C$ (1/3サイズ)
- 3) USE (変化率) の誤差: M1材 -13% (1/3サイズ)
- 4) 照射後のDBTTは母材に比べ高くはならない。

○運転条件 (RT(NDT)調整値と照射後USEを用いて)

- 1) USEが68J以上
(非照射材=250Jの27%) $\Rightarrow -67\%$ までOK
- 2) 運転温度がRTNDT調整値+ $57^{\circ}C$ 以上 $\Rightarrow RT=231^{\circ}C$ (504K)
(非照射材=260K $\Rightarrow \Delta RT=504-260=244^{\circ}C$ 上昇までOK)
- 3) 非常時冷却水注入に伴なう要件を満足すること

図 4.2.2-21 サブサイズ試験片を用いた衝撃試験技術に関する得られた知見^{注25)}



原子力安全に向けた材料研究のどこにインベストメントするのか？

図 4.2.2-22 得られた知見を踏まえた提言

^{注25)} 図中の「 $\Delta RT(NDT)$ (関連温度の移行量)」は、遷移温度移行量(ΔT_{41J})を意味する。「RT(NDT)調整値」については注 37) 参照。

(3) JAEA における研究

原子炉圧力容器鋼材を対象とした照射材の微細組織分析に関する研究(全体の概要は図 4.2.2-23 参照)が(国研)日本原子力研究開発機構(以下, JAEA)において行われていることから、その研究動向について調査した。

a. APT による溶質原子クラスターの分析

APT による溶質原子クラスターの分析に関する研究動向の調査結果を以下に示す。JAEA では、4. 2. 4 項に示す国内照射データの統計解析に関する研究を踏まえ、高照射量領域において Si 等の溶質原子が溶質原子クラスター形成や成長に与える影響について分析を進めている(図 4.2.2-24 参照)。まず、溶質原子クラスター体積率について JAEA による溶質原子クラスター抽出法により算出した結果と、4. 2. 1 項に示す電中研による溶質原子クラスター抽出法により算出した結果を比較して、溶質原子クラスター体積率の平方根と ΔT_{41J} 実測値の関係で整理して図 4.2.2-25 に示す。溶質原子クラスター表面の Fe を取り除く手法の違い(JAEA の手法では溶質原子クラスターに含まれない原子から一定距離にある周辺原子を溶質原子クラスターから取り除くのに対し、電中研の手法では周辺原子のうち隣接するコア原子が 3 つ未満の原子を取り除く)の影響で JAEA の抽出法では溶質原子クラスター直径が若干大きく算出され、体積率も大きめとなる傾向であったが、JAEA の分析においても、溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量には一定のばらつきの範囲で線形の相関が認められた。

次に、溶質原子クラスター中の Cu 原子と Si 原子の割合を分析した結果、図 4.2.2-26 に示すように溶質原子クラスター中の Cu 原子と Si 原子に負の相関が認められること、また溶質原子クラスター中の Cu 原子と Si 原子の総和は試料によらずほぼ一定となっていたことから互いに相殺するような傾向となっており、Cu 含有量が低くなるほど Si 原子の占める比率が高くなることが確認された^[43]。また、溶質原子クラスター中の各元素の分布を確認した結果を図 4.2.2-27 に示すが、Cu のギニエ半径は小さく溶質原子クラスターの中心に分布し、Mn, Ni, Si は溶質原子クラスター全体に渡って分布する傾向であった^[43]。

質疑応答では、Cu 原子と Si 原子に負の相関があるとの結果(図 4.2.2-26)と、Si が溶質原子クラスターの外側に析出している結果(図 4.2.2-27)の関連について質問があり、JAEA の委員より、当初 Cu 原子が減るとそれを補うように Si 原子が析出すると予想していたが図 4.2.2-27 ではそのような傾向が確認できておらず、理由については解明できていないとの回答があった。また、JAEA の委員より、現在得られている知見のみで Si の効果を脆化予測法にどう反映するかまでは提言できないとの指摘があった。

目的と実施内容

高照射量領域における照射脆化に影響を及ぼす因子を適切に把握し、関連温度移行量評価の保守性確認に資する技術的知見を整備する。

- ・統計解析手法を整備するとともに、監視試験データ等の解析により脆化因子や関連温度移行量の取り得る範囲等を評価する。
- ・三次元アトムプローブ及びオージェ電子分光分析を用いて、高照射量領域特有の溶質原子クラスタの形成・成長及び非硬化型脆化の可能性を確認する。

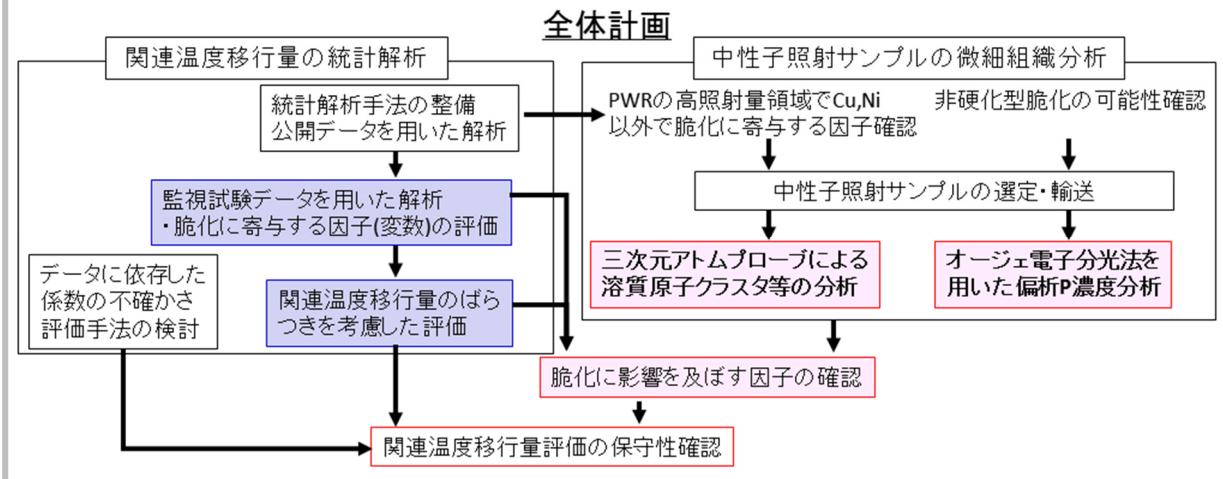


図 4.2.2-23 JAEA における照射材の微細組織分析に関する研究の概要

背景

- ・ CuやNiが脆化に影響を及ぼす重要な因子であると考えられてきた。
- ・ 統計解析結果から、Cu, Niに加えてSiの脆化への影響が示唆された。

目的

- ・ 中性子照射によって生成する溶質原子クラスタを分析し、数密度、サイズ(クラスタ直径)、体積率や組成と照射量、Cu含有量等との関係を評価する。
- ・ 高照射量領域においてSi等の溶質原子がクラスタ形成・成長に与える影響について確認する。

統計解析により脆化への影響が示唆された因子(入力変数)

データ区分	入力変数の組合せ		
全データ	Fluence ^{0.6}	:	Cu, Ni
BWR	Fluence ^{0.9}	Flux ^{0.9}	Cu
PWR	Fluence ^{0.7}	:	Cu, Ni, Si

図 4.2.2-24 APT による溶質原子クラスターの分析

- 分析装置、解析アルゴリズムの違いにより体積率に違いが見られたが、体積率の平方根と関連温度移行量との間には線形の相関があった。

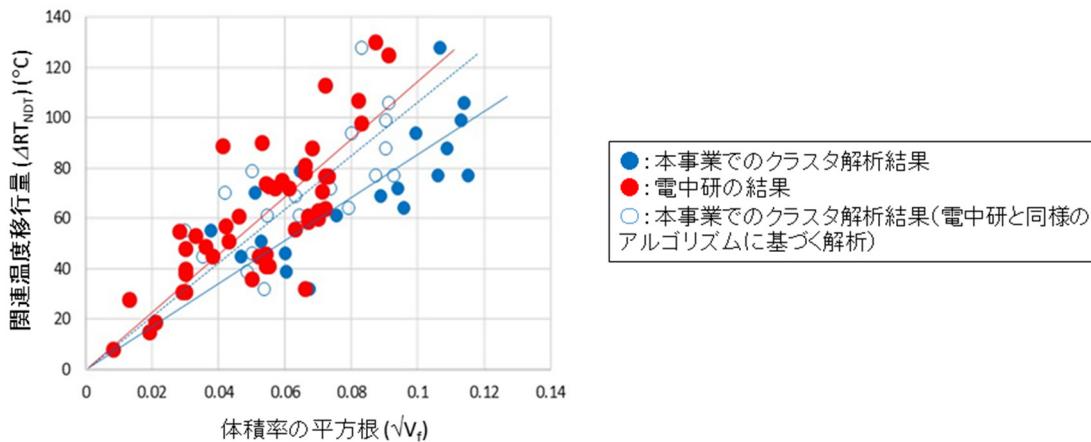


図 4.2.2-25 溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の関係^{注26)}

全サンプルに対して、クラスタ中の全溶質原子中のCuの割合($Cu/(Cu+Mn+Ni+Si)$)とSiの割合($Si/(Cu+Mn+Ni+Si)$)との関係、及び、バルクCu濃度に対する $(Cu+Si)/(Cu+Mn+Ni+Si)$ を評価。

- クラスタ中のCuとSiとの負の相関を確認。
- $Cu + Si$ がサンプルに依らずほぼ一定であることを確認。

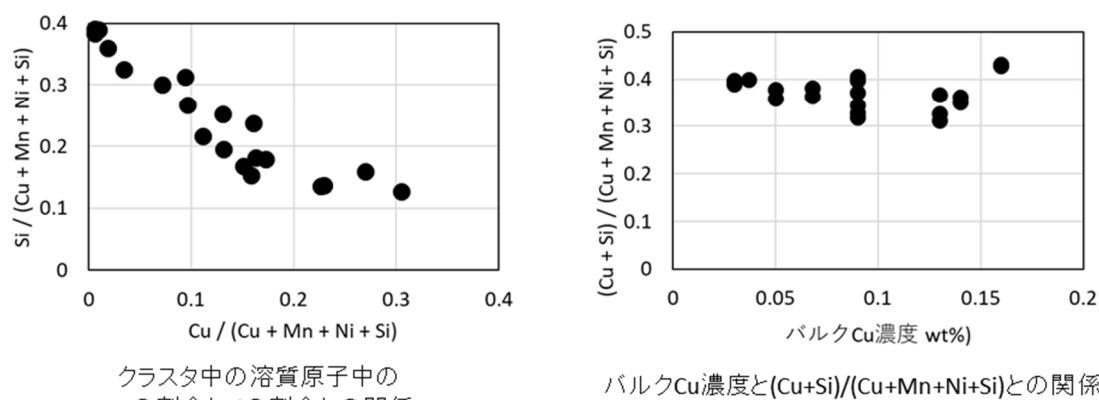


図 4.2.2-26 溶質原子クラスター中の Cu 原子及び Si 原子の比率^[43]

注26) 図中のグラフ縦軸の「関連温度移行量(ΔRT_{NDT})」は、遷移温度移行量(ΔT_{41J})の実測値を意味する。

- Cuはクラスタの中心に分布し(半径が小さい)、Mn, Ni, Siは全体的に分布。
- 大きいクラスタになるほどCuが他の元素より相対的に中心に分布する傾向。
(1:1の線より傾きが小さい)

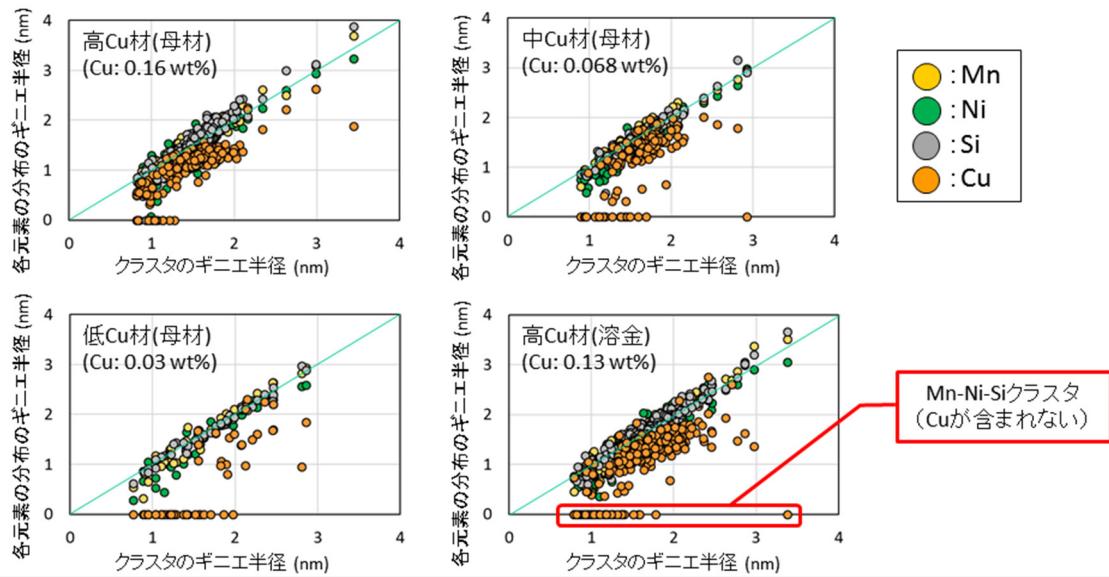


図 4.2.2-27 溶質原子クラスター中の各原子のギニ工半径^[43]

b. オージェ電子分光分析による粒界偏析元素の分析

図 4.2.2-23 に示した照射材の微細組織分析に関する研究のうち, オージェ電子分光分析による粒界偏析元素の分析に関する研究動向について調査した結果を以下に示す。原子炉圧力容器鋼材では, 熱処理や照射により P 等の不純物元素の粒界への偏析が進む。P の粒界偏析については, 試験炉照射材の分析結果を踏まえて, P 含有量が 0.02wt.%以下の鋼材では粒界脆化が生じる可能性は低いと評価されている^[44]が, 実機照射材と試験炉照射材の違い(照射速度の違い)に関する知見が限られていることから, 監視試験片のオージェ電子分光分析を行なった(図 4.2.2-28 参照)。分析は, PWR プラントで照射された脆化量が比較的大きい母材及び溶接金属の監視試験片(P 含有量は 0.01wt.%程度)並びに比較標準材(P 含有量は 0.007wt.%)の試料を対象とした。オージェ電子分光分析装置を用いた粒界破面の偏析元素の分析方法を図 4.2.2-29 に示す。比較標準材の P の粒界偏析量(Monolayer Coverage: 被覆率)について, 今回分析した PWR プラントの監視試験片の試料と, 試験炉照射された試料(既往研究^[45]にて分析)の結果を比較して図 4.2.2-30 に示す。両者の比較から, P の粒界偏析量は照射速度の低下とともに増大する傾向がみられるが, その依存性は小さい(PWR プラントと試験炉で被覆率の差が 0.01 度)と判断された^[46]。この結果を踏まえ, P 含有量との関係を, 照射速度依存性を考慮せずに既往研究も含めて整理した結果を図 4.2.2-31 に示す。同図では P の粒界偏析量として, 未照射の比較標準材からの差分(ΔC_p^{gb} で整理)を求め, P 含有量との関係を整理している。既往研究(試験炉照射材の分析結果)において, P 含有量が 0.02wt.%以下かつ ΔC_p^{gb} が 0.12 以下の範囲では粒界脆化が起こる可能性は低いとの知見が得られているが, 今回分析した照射材はいずれもこの範囲内にあり, 照射速度を考慮しても粒界脆化は顕在化しない可能性が高いと評価された^[46]。

質疑応答では, P の影響について APT の分析で何か知見が得られているか質問があり, JAEA の委員より, 今回分析した照射材では P の含有量が少ないと, また Cu と P の含有量には相関があり P 単独の影響を確認できなかったとの回答があった。

以上, a.に示した溶質原子クラスターの分析については, Cu 原子と Si 原子の総和は試料によらずほぼ一定となっていたこと, Cu 含有量が低くなるほど Si 原子の占める比率が高くなり, Cu 含有量の低い鋼材の溶質原子クラスターの形成に Si 含有量の影響が大きくなることを示唆する結果が得られた。また, b.に示した粒界偏析元素の分析については, PWR プラントの監視試験片と試験炉照射材の比較から P の粒界偏析量に顕著な照射速度依存性が認められなかつたことや既往研究と同様に P の粒界偏析量と P 含有量に正の相関が認められたことを踏まえて, 試験炉照射材に基づく既往研究の知見は実機照射材にも適用可能と判断され, 国内の原子炉圧力容器鋼材では P の含有量が低く, P の粒界偏析による粒界脆化は顕在化する可能性は低いと評価された。得られた知見を図 4.2.2-32 に示す。

背景

圧力容器鋼では、熱処理や中性子照射によりP等の不純物の粒界偏析量が増加する。Pの粒界偏析による粒界強度の低下は、非硬化型脆化の一因となると考えられている。

- 試験炉照射材(照射速度 $>5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)のデータから、P含有量が0.02 wt.%以下(Pの粒界偏析量の増加量が0.12以下)では、粒界脆化が生じる可能性は低いと考えられる※。
- 実機照射材と試験炉照射材との違い(照射速度依存性)に関するデータは限られている。

目的

- Pの粒界偏析量の照射速度依存性の有無を明らかにする。
- 実機の高照射量領域における粒界脆化の顕在化について調べる。

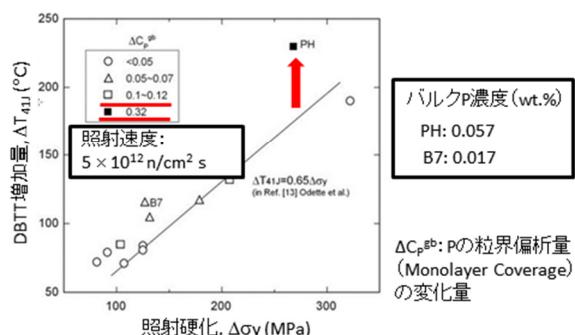


図 4.2.2-28 オージェ電子分光分析による粒界偏析元素の分析^{注27)}

試験条件

装置：電界放出型オージェ電子分光分析装置

(PHI-710)

破断条件：液体窒素温度 @ $<10^{-8} \text{ Pa}$

ビーム：5keV, 10nA

視野：15～20個の粒界破面を分析

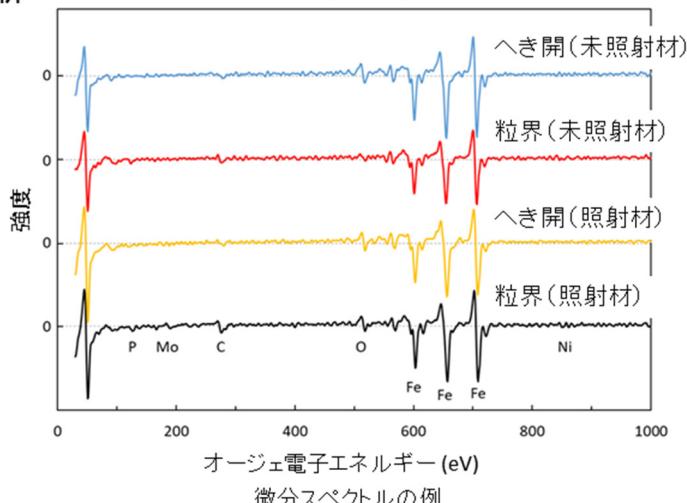
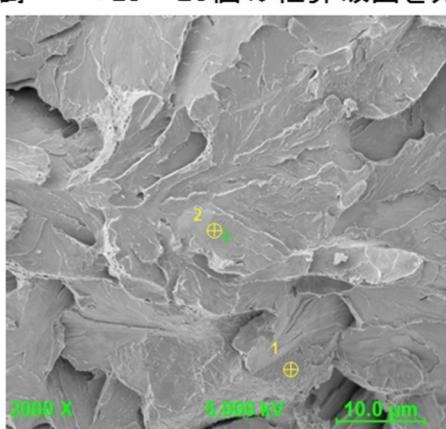
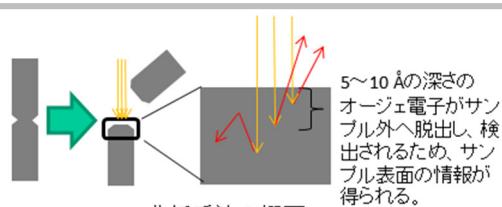


図 4.2.2-29 オージェ電子分光分析による粒界破面の偏析元素の分析方法^[46]

^{注27)} 図中のグラフは、ASTM International 社の許可を得て文献[44]のグラフを転載した。Reproduced, with permission from the Journal of ASTM International, Vol.6, Issue 7, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

実機と試験炉で照射された比較標準材(S1材)について、既往の分析結果と比較し、照射速度依存性の有無を評価した。

- 試験炉照射材に対し、実機照射材ではPの偏析量が若干増加する傾向。
- 偏析量の平均値の比率(Pの偏析量(試験炉照射材)/実機材))は0.83～0.90。
- 標準偏差を考慮すると、その差は軽微である。
- 高照射量領域ではP偏析量の照射速度依存性は小さい。**

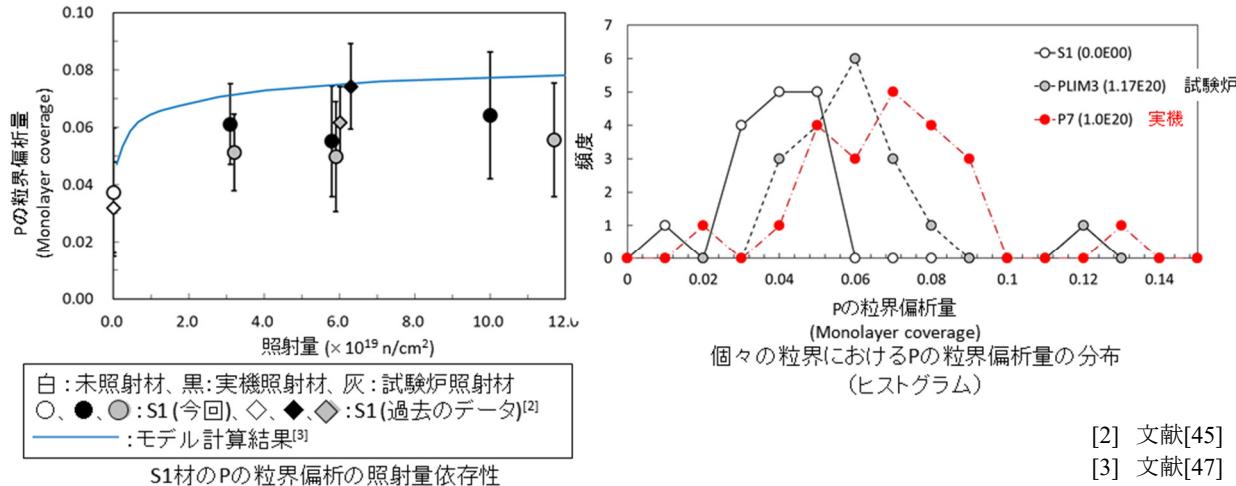


図 4.2.2-30 P の粒界偏析に関する実機照射材及び試験炉照射材の照射速度依存性^[46]

Pの偏析量とS1未照射材のPの偏析量の差分(ΔC_p^{gb})と、 ΔRT_{NDT} との関係について既往知見(VVER鋼を除く)と比較した。

- 本研究における ΔC_p^{gb} は溶金で最大値となり、0.073であった。
- 試験炉照射材を用いた既往研究では、バルクP濃度が0.02 wt%以下で ΔC_p^{gb} が0.12以下では粒界脆化が起こる可能性は低いとの報告がある^[1]。
- 国内の圧力容器鋼のバルクP濃度、照射量の範囲では、**粒界脆化は顕在化しないと考えられる。**

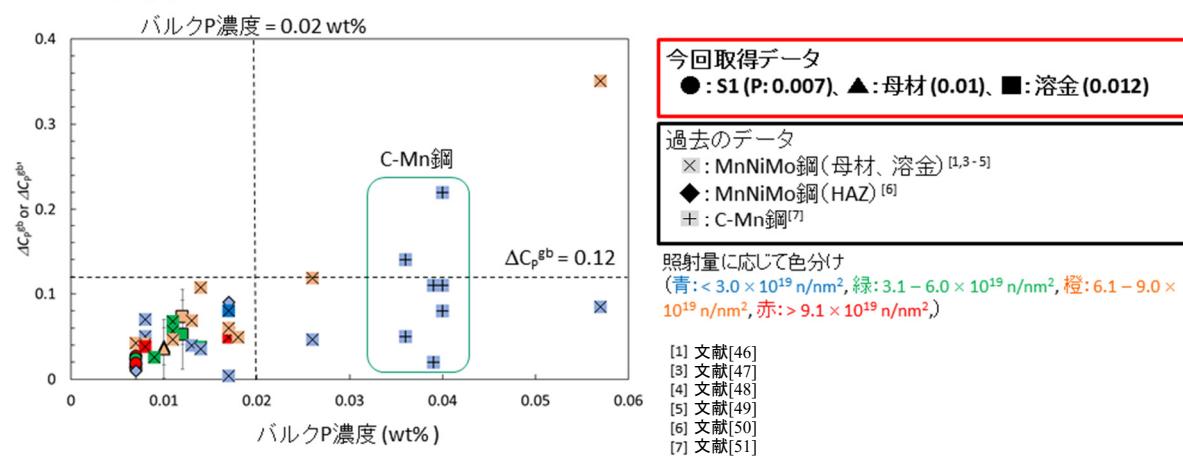


図 4.2.2-31 既往研究も含めた粒界脆化の可能性に関する評価結果^[46]

三次元アトムプローブによるクラスタ分析

溶質原子クラスタの数密度、サイズ(クラスタ直径)、体積率や組成と照射量、Cu含有量等との関係の評価、溶質原子がクラスタ形成・成長に与える影響の検討を行った。特に、改定中の脆化予測法やJAEAにおける統計解析において脆化への寄与が示唆されたSiに着目してデータを整理した。

- クラスタの形成にバルクCu濃度が大きな影響を与えることを確認した。
- クラスタ中のCu + Siは材料組成に依らずほぼ一定となり、低Cu材ではSiの占める比率が高くなることが示された。低Cu材のクラスタ形成においてSiの影響が大きくなることを示唆する結果が得られた。

オージェ電子分光(AES)による粒界偏析元素分析

粒界へのPの照射誘起偏析の照射速度依存性の有無、及び高照射量領域における粒界脆化顕在化の有無について調べるため、実機及び試験炉で照射された圧力容器鋼に対して、Pの粒界偏析量の分析を行った。

- S1材の実機照射材と試験炉照射材との比較から、有意な照射速度依存性は確認できなかった。
- 既往研究データのP偏析量はバルクP濃度と正の相関を示し、本研究の測定結果と同様の傾向であった。試験炉照射材データに基づく既往知見を実機の評価に適用できる見通しを得た。
- バルクP濃度及びPの偏析量の増加量($\Delta C'_{\text{gb}}$)は、既往知見で粒界脆化の顕在化が懸念されている値より十分に低いことが示された。国内圧力容器鋼において粒界脆化による非硬化型脆化は顕在化しないと考えられた。

図 4.2.2-32 照射材の微細組織分析に関する研究で得られた知見

4. 2. 3 国外の脆化予測法の国内鋼材への適用性の調査

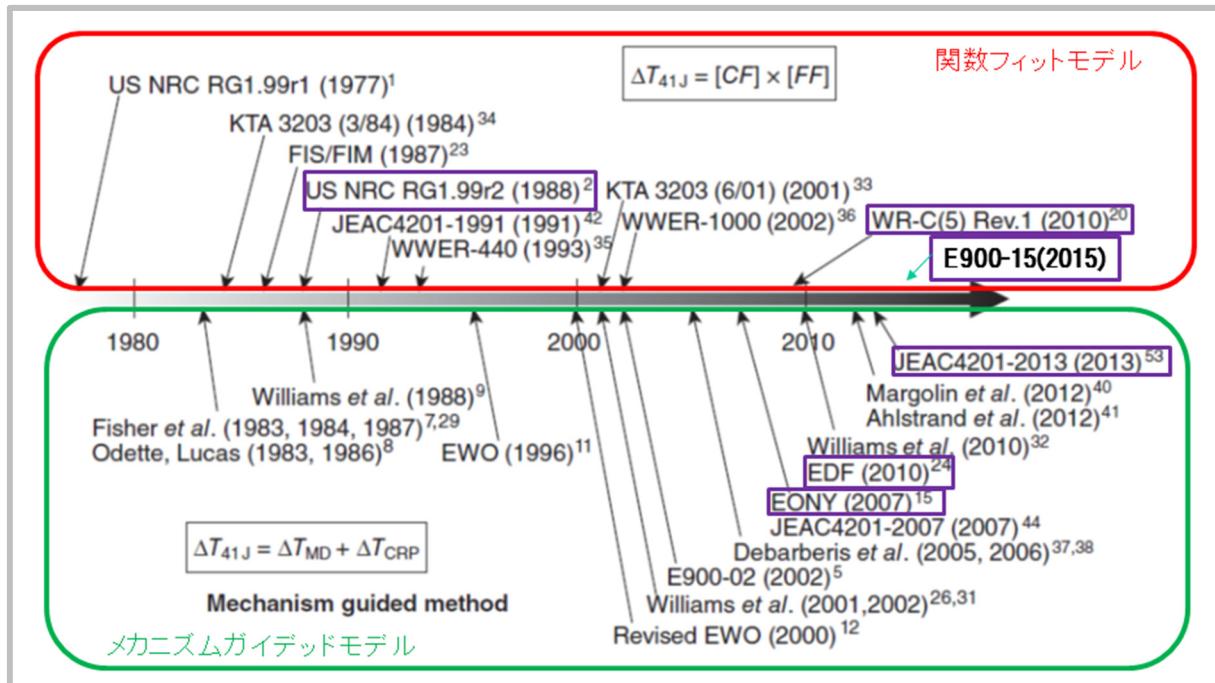
国内の現行予測法の概要については、4. 1. 2項に示したが、国外の主要な脆化予測法として、米国で開発された Regulatory Guide 1.99 rev.2^[52]、10CFR50.61a(EONY)^[53,54]、WR-C(5)^[55]及び ASTM E900-15^[56]の脆化予測法、これに加えてフランス(EDF)で開発された脆化予測法^[57]について調査した。

これら脆化予測法のうち、10CFR50.61a(EONY)及び EDF の脆化予測法は、現行予測法と同様に照射に伴うミクロ組織変化を踏まえた定式化となっており、それ以外の脆化予測法は照射脆化に寄与すると考えられる化学成分や照射条件に対する傾向分析結果を踏まえて定式化された関数フィットに基づく式となっている(図 4.2.3-1 参照)^[58]。これら国外の脆化予測法について、その特徴をまとめて図 4.2.3-2 に示す^[59]。

これら国外の脆化予測法により、図 4.2.3-3 に示すように国内全照射データ(国内プラントの監視試験データ及び試験炉照射データ)を対象として遷移温度移行量を予測した結果を、現行予測法による結果と比較して図 4.2.3-4 に示す。ここで、現行予測法により求めた遷移温度移行量としては補正を行わない ΔT_{41J} の計算値(ΔRT_{NDT} 計算値)を用いた。その結果、これら国外の脆化予測法はいずれも国内全照射データに対しては遷移温度移行量を過小評価する傾向があり、国内鋼材に対しては現行予測法が最も良好な予測結果を示した^[59]。

これら国外の脆化予測法は、それぞれ適用される国の鋼材を最も良好に予測できるよう基本モデル式に含まれる係数が最適化されたものである。そこで、これら脆化予測法の係数を国内全照射データに対して再最適化して再度予測性を評価した。対象は、10CFR50.61a(EONY)及び ASTM E900-15 の 2 つとした(図 4.2.3-5 参照)。ここで、最適化の対象としたデータベースは 2018 年 1 月までに得られた PWR プラント及び BWR プラントの監視試験データ(比較標準材含む)並びに現行予測法の策定に用いた試験炉照射データで構成される。10CFR50.61a 及び ASTM E900-15 の脆化予測法の基本モデル式の係数を国内全照射データに対して再最適化して得られた式を図 4.2.3-6 及び図 4.2.3-7 に示す。また、得られた式による国内全照射データに対する遷移温度移行量の予測結果を、現行予測法による予測結果と比較して図 4.2.3-8 に示す。係数再最適化後の 10CFR50.61a(EONY)及び ASTM E900-15 の脆化予測法では、図 4.2.3-4 に示した再最適化前の予測結果と比べて国内全照射データに対する予測性は改善するが、依然として現行予測法の予測残差の標準偏差が最小となることが確認された。

質疑応答において、国外の脆化予測法の予測残差の傾向から今後の脆化予測法の見直しに向けて何か抽出すべき知見がないかとの観点から、現行予測法の適用範囲外となるデータについて、その予測残差に何か傾向が見られるかとの質問があり、電中研の委員より、現行予測法には最適化対象データとして材料規格上適用範囲外となる Ni 含有量が 1.78wt.% の試験炉照射材も含まれているが、そのデータに対する予測性はむしろ今回再最適化した国外の脆化予測法よりもよい傾向であるとの回答があった。

図 4.2.3-1 国内外の脆化予測法とその変遷^{[58]注 28)}

予測式	計算に使用するパラメーター									適用可能 Cu範囲
	Fluence	Flux	照射 温度	Cu	Ni	P	Mn	Si	C	
US NRC Rg1.99r2	○			○	○					母材、溶接金属
WR-C(5)	○		○	○	○	○	○			圧延材、鍛造材、溶接金属
E900-15	○		○	○	○	○	○	○		圧延材、鍛造材、溶接金属
EONY	○	○	○	○	○	○	○	○		圧延材(CEか否か)、鍛造材、 溶接金属(Linde80か否か)
EDF	○			○	○	○				母材、溶接金属
JEAC 4201- 2013	○	○	○	○	○					なし

図 4.2.3-2(1/2) 主要な脆化予測法において考慮されるパラメータ^{[59]注 29)}^{注 28)} 同図は、Elsevier 社の許可を得て文献[58]の図に一部内容を追加して転載した。^{注 29)} 同図は、(一社)日本保全学会の許可を得て文献[59]の図を転載した。

予測式	最適化に用いたデータ数	残差の標準偏差(°C)	照射量範囲(n/cm ² , E>1MeV)
US NRC Rg1.99R2	177	Base:9.4 Weld:15.6	制限なし
WR-C(5)	2561	0.073(Φ) ^{0.138}	1.5x10 ¹⁷ -1.5x10 ²⁰
E900-15	1878	$SD = \begin{bmatrix} W: 7.681 \\ P: 6.593 \\ F: 6.972 \end{bmatrix} \times (\Delta T_{41J})^{[W:0.181 \quad P:0.163 \quad F:0.199]}$	10 ¹⁷ -2x10 ²⁰
EONY	855	Plate:8.3(Cu ≤ 0.072), 11.8(Cu > 0.072) Forging:9.7(Cu ≤ 0.072), 10.9(Cu > 0.072) Weld:10.3(Cu ≤ 0.072), 14.7 (Cu > 0.072)	10 ¹⁶ -7.13x10 ¹⁹
EDF	427	Base(forging): 12.7 Weld: 13.3 SRM: 9.3	3x10 ¹⁸ -1.2x10 ²⁰
JEAC 4201-2013	371	9.5 (M_c 補正なし)	10 ¹⁷ -1.3x10 ²⁰

図 4.2.3-2(2/2) 主要な脆化予測法の最適化対象データ数及び ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差

■ 予測式

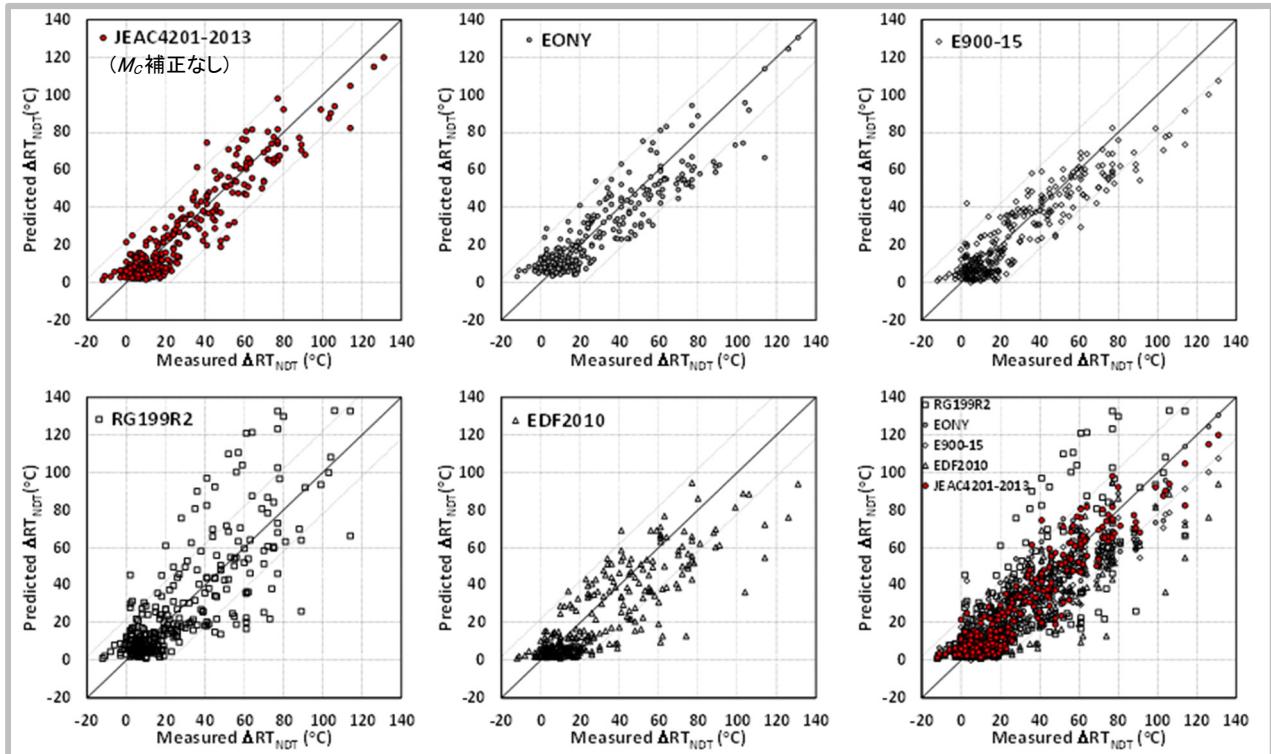
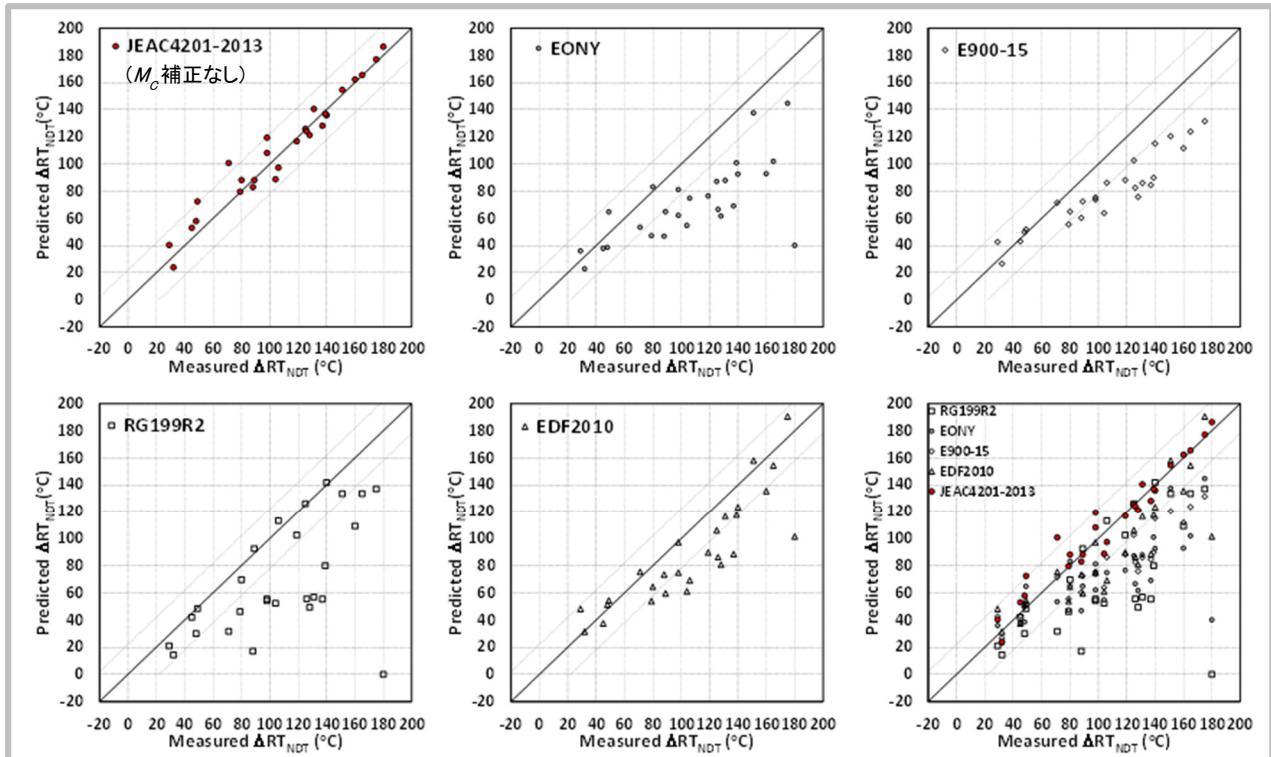
- JEAC4201-2013(国内現行予測式)
- RG1.99R2(米国予測式)
- EONY(米国代替PTS評価)
- E900-15(ASTM規格)
- EDF(仏国予測式)

■ データ

- 国内PWRおよびBWR監視試験データ、PTS※1およびPLIM※2 の試験炉照射データの一部

※1 文献[15]
※2 文献[28]

図 4.2.3-3 国内外の主要な脆化予測法の国内鋼材への適用性評価

図 4.2.3-4(1/2) 国内監視試験データに対する予測結果の比較^{注30)}図 4.2.3-4(2/2) 国内試験炉照射データに対する予測結果の比較^{注30)}

注30) 図中のグラフ縦軸の「Predicted ΔRT_{NDT} 」は遷移温度移行量(ΔT_{41J})の計算値を意味し、横軸の「Measured ΔRT_{NDT} 」は遷移温度移行量(ΔT_{41J})の実測値を意味する。

- EONYおよびE900-15の係数を現在電中研で予測式開発に使用しているデータを用いて再フィットした
- 対象とした係数
 - EONY: 24個
 - E900-15: 32個
- データ
 - 国内PWRおよびBWR監視試験データ、PTSおよびPLIMデータの一部

※1 文献[15]

※2 文献[28]

図 4.2.3-5 10CFR50.61a(EONY)及びASTM E900-15 の基本モデル式による
国内鋼材を対象とした係数最適化

$$\Delta T_{41J} = \frac{5}{9} \{ MF \ term + CRP \ term \}$$

$$MF \ term = A(1 + 0.001453 (1.8T_{irrad} + 32))(1 + 9.42P \times Mn^{3.44})\sqrt{\phi t_e}$$

$$CRP \ term = B(1 + 7.54Ni^{2.648})f(Cu_e, P)g(Cu_e, Ni, \phi t_e)$$

$$A = \begin{cases} 3.26 \times 10^{-8}, \text{for forgings} \\ 5.24 \times 10^{-8}, \text{for plates} \\ 4.64 \times 10^{-8}, \text{for welds} \end{cases} \quad \phi t_e = \begin{cases} \phi t, \text{for } \phi \geq 2.30 \times 10^{10} \\ \phi t \left(\frac{2.30 \times 10^{10}}{\phi} \right)^{0.495}, \text{for } \phi < 2.30 \times 10^{10} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 102.3, \text{for forgings} \\ 212.2, \text{for plates in non-CE manufactured vessels} \\ 135.2, \text{for plates in CE manufactured vessels} \\ 136.4, \text{for welds} \\ 128.2, \text{for standard reference material (SMR) plates} \end{cases} \quad \max(Cu_e) = \begin{cases} 0.243, \text{for typical (Ni>0.5)Linde 80 welds} \\ 0.301, \text{for all other materials} \end{cases}$$

$$Cu_e = \begin{cases} 0, \text{for Cu} \leq 0.068 \text{ wt.\%} \\ \min[Cu, \max(Cu_e)], \text{for Cu} > 0.068 \text{ wt.\%} \end{cases}$$

$$f(Cu_e, P) = \begin{cases} 0, \text{for Cu} \leq 0.068 \text{ wt.\%} \\ [Cu_e - 0.068]^{0.951}, \text{for Cu}>0.068 \text{ wt.\% and P}\leq 0.004 \text{ wt.\%} \\ [Cu_e - 0.068 + 2.055(P - 0.004)]^{0.951}, \text{for Cu}>0.068 \text{ wt.\% and P}>0.004 \text{ wt.\%} \end{cases}$$

$$g(Cu_e, Ni, \phi t_e) = 0.679 + 0.884 \tanh \left[\frac{\log_{10}(\phi t_e) + 1.641Cu_e - 0Ni - 19.237}{1.656} \right]$$

※赤字: 対象とする係数

Φ: 照射量(n/cm^2)
 Φ: 中性子束($n/(s \cdot cm^2)$)
 Tirrad: 照射温度(°C)
 Cu: 銅含有量(wt.%)
 Ni: ニッケル含有量(wt.%)
 P: リン含有量(wt.%)
 Mn: マンガン含有量(wt.%)

図 4.2.3-6 10CFR50.61a(EONY)の基本モデル式^[54]の係数最適化結果

$$\Delta T_{41J} = \frac{5}{9} [\max\{\min(Cu, 0.28) - 0.037, 0\}M + B]$$

$$M = \begin{bmatrix} 1.03 \text{ (Welds)} \\ 1.03 \text{ (Plates)} \\ 1.12 \text{ (Forgings)} \end{bmatrix} \max\{\min[85.780(\ln(\phi t) - \ln(2.44 \times 10^{16})), 1032.6], 0\}$$

$$\times \left(\frac{1.8T_{irrad} + 32}{540} \right)^{-4.30} \left(0.186 + \frac{P}{0.077} \right)^{-0.153} \left(0.878 + \frac{Ni^{2.66}}{0.67} \right)^{0.808}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0462 \text{ (Welds)} \\ 0.0543 \text{ (Plates)} \\ 0.0541 \text{ (Forgings)} \end{bmatrix} \times 6.04 \times 10^{-11} (\phi t)^{0.683} \left(\frac{1.8T_{irrad} + 32}{540} \right)^0 \left(0.0650 + \frac{P}{0.077} \right)^{0.212}$$

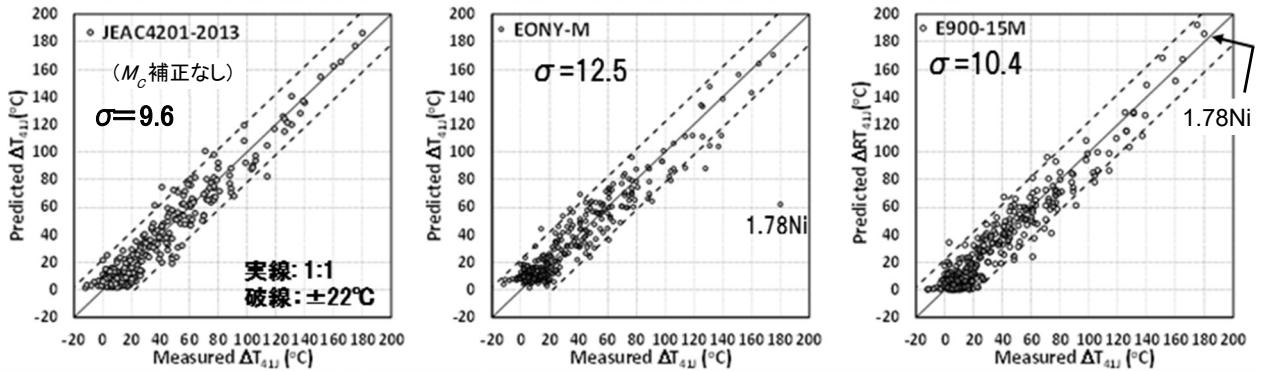
$$\times \left(4.08 \times 10^{-5} + \frac{Ni^{57.5}}{0.67} \right)^{0.021} \left(\frac{Mn}{1.39} \right)^{0.279}$$

※赤字: 対象とする係数

ϕt : 照射量(n/cm^2)
 T_{irrad} : 照射温度($^{\circ}C$)
Cu: 銅含有量(wt.%)
Ni: ニッケル含有量(wt.%)
P: リン含有量(wt.%)
Mn: マンガン含有量(wt.%)

図 4.2.3-7 ASTM E900-15 の基本モデル式^[56]の係数最適化結果

上段: 予測値 vs 実測値(図中の σ は残差(予測値-実測値)の標準偏差)



下段: 予測値(2013追補版) vs 予測値(再フィットした米国予測法)

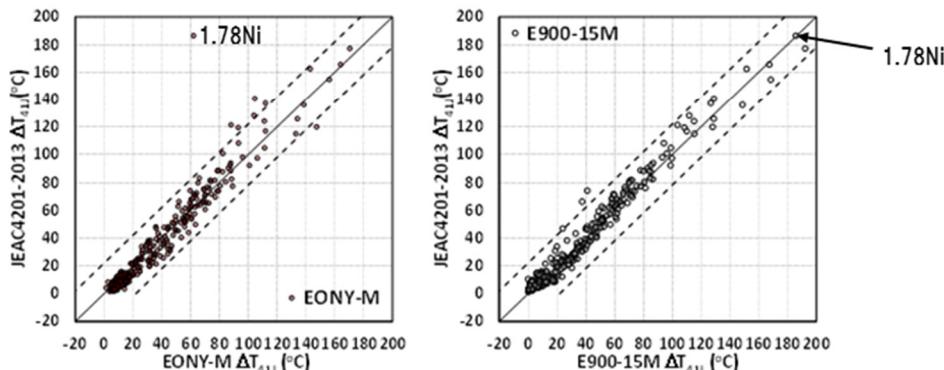


図 4.2.3-8 国内全照射データに対する予測結果の比較

4. 2. 4 国内照射データの統計解析に関する研究

国内全照射データを対象とした統計解析に関する研究が JAEA により進められていることから、その研究動向について調査した。

国内外の脆化予測法は、照射に伴うミクロ組織変化を踏まえた式もしくは関数フィットに基づく式のいずれであっても、基本モデル式を策定した上で照射データに対する最適化により係数を決定する方法で策定されたものである。JAEA では、基本モデル式を用いずにデータを確率分布の重ね合わせで表現するノンパラメトリックベイズ法(以下、BNP 法。概要は図 4.2.4-1 及び図 4.2.4-2 参照)を適用して、鋼材の化学成分や照射条件等の照射脆化に寄与すると考えられる因子と遷移温度移行量の関係についてベイズ統計に基づく解析を実施して、実測データの真値が取り得る範囲を推定すると共に、因子を変更した場合の遷移温度移行量への影響について分析を進めている(図 4.2.4-3 参照)^[60]。

この分析結果について、図 4.2.4-4 に示すように Gelman-Rubin 統計量に基づき信頼性を評価すると共に、WAIC^{注 31)}と呼ばれる指標を用いて予測性能を評価した。Gelman-Rubin 統計量は、モンテカルロサンプリングの信頼性を評価する指標であり、値が 1.1 未満であれば試行間の有意差がなく信頼性が高いと評価される(図 4.2.4-5 参照)。また、WAIC の概要を図 4.2.4-6 に示すが、この指標が小さいほど予測性が高いと判断される。

BWR プラントの監視試験データを対象としてパラメータの組み合わせを変えて WAIC を評価した結果を図 4.2.4-7 に示す。同図は、Gelman-Rubin 統計量を用いて信頼性が高いと評価されたパラメータの組み合わせ{(照射量)^{0.9}, (中性子束)^{0.9}}を前提として、これに新たにパラメータを加えた場合の WAIC の変化と、遷移温度移行量の実測値と BNP 法に基づく予測残差の標準偏差の関係を示している。このデータセットの場合は、Cu 含有量のみを加えたケースで WAIC が最小となった^[61]。同様に、他のデータセットについても検討を進め、データセットごとに WAIC が最小となるパラメータの組み合わせを評価した結果を図 4.2.4-8 に示す。このうち、国内全照射データ、BWR 監視試験データのみ及び PWR 監視試験データのみの 3 種類のデータ区分について、それぞれ WAIC が最小となるパラメータの組み合わせを用いて BNP 法により遷移温度移行量を計算し、計算値と事後分布の確信区間を評価した。その結果を図 4.2.4-9 に示す。国内全照射データを対象として遷移温度移行量を計算するよりも BWR ないしは PWR 監視試験データのみで遷移温度移行量を計算するほうが、予測残差の標準偏差が小さくなることがわかる。

以上、国内全照射データを対象とした BNP 法による分析の結果、データ区分ごとに最適なパラメータの組み合わせは異なり、パラメータの数を増やすことが必ずしも予測精度を向上させる結果とならないこと、また、データ区分を BWR ないしは PWR 監視試験データとして評価するほうが遷移温度移行量の予測残差の標準偏差は小さくなることがわかった。さらに遷移温度移行量に寄与するパラメータとして、照射条件については照射量及び中性子束が、化学成分については Cu 含有量、Ni 含有量及び Si 含有量が抽出された。

質疑応答では、BNP 法の手法としての制約について質問があり、JAEA の委員より、解析

^{注 31)} 広く使える情報量基準(Widely Applicable Information Criterion)の略称。

が収束するパラメータの上限が 7 程度であることから析出物や転位などのミクロ組織に関する情報をパラメータとして加えるのは難しいこと、照射温度は国内鋼材のデータベースの値の範囲が狭いため、これをパラメータとすると解析が収束しにくいといった制約の例が挙げられた。また、初期特性の影響の有無の観点で、 RT_{NDT} 初期値をパラメータとして加えた場合に何か影響が見られたか質問があり、JAEA の委員より、今回の解析では明示的に影響は見られておらず、その原因として RT_{NDT} 初期値自体も Ni 含有量などの他のパラメータと相関があるので、例えばデータセットとして国内全照射データを対象とした場合には Cu 含有量及び Ni 含有量のみで十分な相関が得られたと考えられるとの回答があった。

また、電中研においても、類似の取り組みとしてニューラルネットワーク(概要は、図 4.2.4-10 参照)を用いた国内外の照射データの機械学習により、照射脆化に伴う遷移温度移行量とそれに寄与すると考えられるパラメータの相関を網羅的に分析する検討が進められている。

ノンパラメトリックベイズ*(BNP : Bayesian non-parametric)法

*ノンパラメトリックとはパラメータが無いということではなく、予めパラメータを決めないという意

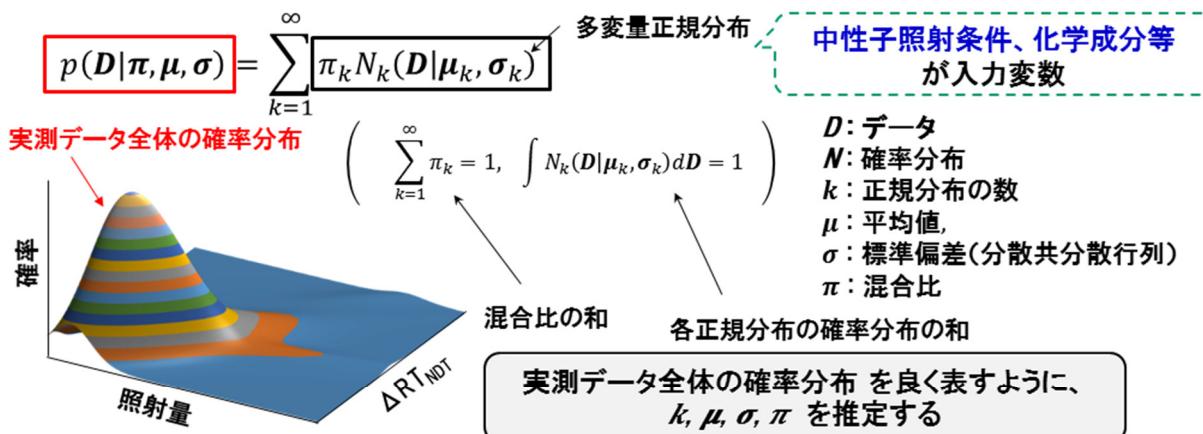
特徴

- 実測データ全体を確率分布の重ね合わせで表現
- 複数の因子が影響し合う実測データの複雑さを自動的に学習して確率分布の数と形状を推定
- データの数(密度)やばらつき等の特徴に応じた確率分布から特定の条件に対応する計算値と確信区間を定量的に推定可能
- オーバーフィッティングを回避可能
- 事前にモデル式を決定しないため、入力変数の変更が比較的容易

図 4.2.4-1 BNP 法の特徴

実測データの確率分布を正規分布の重ね合わせ*で表現

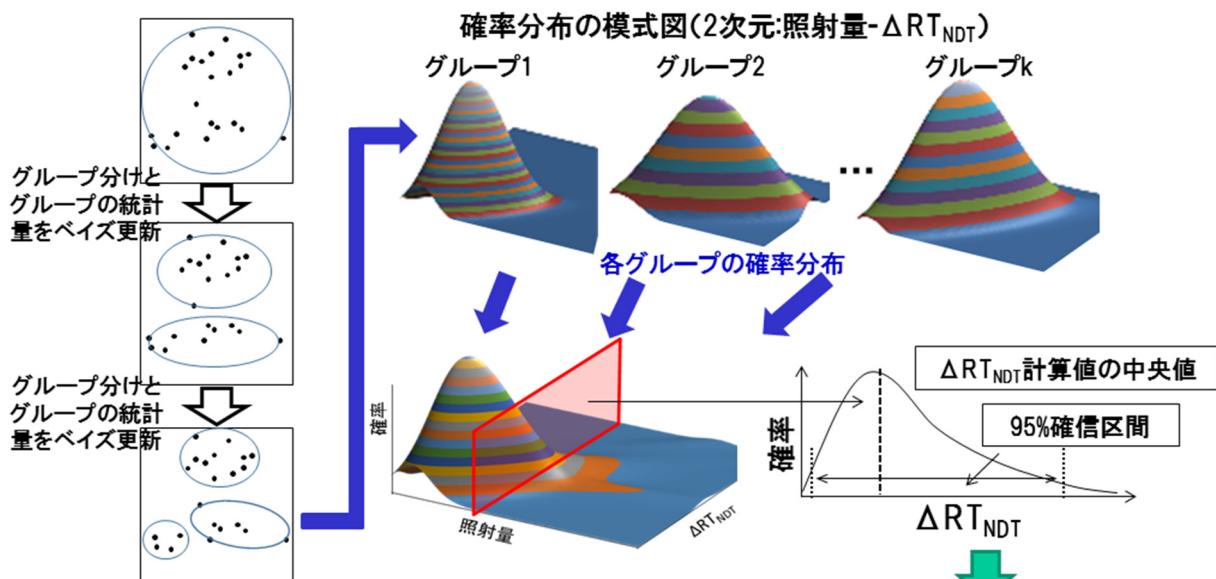
*データに応じて重みをつけて重ね合わせ



- 正規分布の数(グループ数) k はデータの複雑さに応じて決定
- 混合比 π は、正規分布の数とそれぞれの正規分布に所属するデータ数から推定
- 確率分布は複雑で直接は計算できないため、マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法とベイズ推定に基づき導出

図 4.2.4-2(1/2) BNP 法を適用した遷移温度移行量の計算方法(1/2)^{注32)}

グループ分けの模式図(2次元)



- 特定の条件に対応する関連温度移行量(ΔRT_{NDT})の中央値と95%確信区間を推定

図 4.2.4-2(2/2) BNP 法を適用した遷移温度移行量の計算方法(2/2)^{注32)}

注32) 図中の「 ΔRT_{NDT} 」は、遷移温度移行量(ΔT_{41})を意味する。

目的

JEAC4201の技術評価に資する技術的知見の継続的拡充を図る

JEAC4201との対応		
JEAC4201-2007	確認項目	JAEAにおける取り組み
中性子照射に伴うミクロ組織変化と機械的特性の変化に基づく反応速度論的モデル式 $[SC]+[MD]$	高照射量領域における脆化因子の網羅性	統計解析と微細組織分析から、高照射量領域の脆化因子について検討
プラント毎のマージン(M_C) +予測値と実測値の残差の標準偏差等を用いたマージン(M_R)を設定	評価の保守性	ベイズ統計に基づき、データの取り得る範囲を評価
モデル式中の多数の係数をフィットティング	オーバーフィットティング* 係数の不確かさ	データの複雑さを自動的に学習可能な手法を用いてオーバーフィットティングを回避した評価

*実測データにモデルを過剰に適合させることで未知のデータの予測性が悪い状態

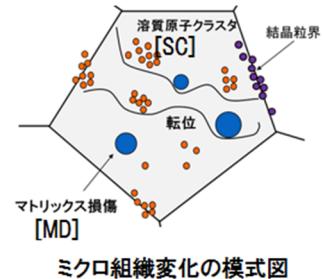


図 4.2.4-3 現行予測法の考え方とBNP 法を適用した本研究の検討内容の関係

目的

中性子照射条件や材料の化学成分等と関連温度移行量の関係について、それらの相互作用を考慮した上で脆化への影響が大きい因子を明らかにする。従来と異なる手法により、関連温度移行量の計算や実測データの不確かさを評価することによって関連温度移行量評価の保守性について確認する。

実施内容

ノンパラメトリックベイズ法を用いた照射脆化データの解析

- 解析の信頼性を確認した後に、予測性に優れる入力変数の組合せを選定
 - 炉型や鋼種などでデータを区分して評価
 - ✓ 「信頼性」: Gelman-Rubin統計量(\hat{R} : $R - \bar{hat}$)
 - ✓ 「予測性」: 広く使える情報量基準(WAIC: Widely Applicable Information Criterion)
- 計算値及び95%確信区間と実測値との関係を評価
- 計算値及び95%確信区間の中性子照射量依存性を評価

図 4.2.4-4 国内全照射データを対象とした統計解析の実施内容

Gelman-Rubin統計量 (\hat{R} : R-hat)

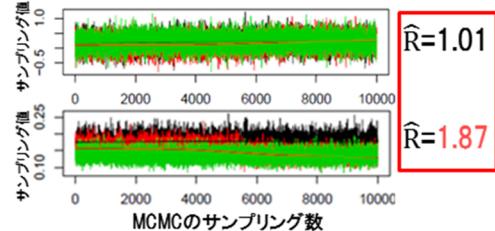
- ・モンテカルロサンプリングの信頼性を確認する一般的な指標
- ・同一条件で複数回解析を実施し、履歴の分散が解析毎に異なるか否かを評価する

評価例

第*i*回目の解析の第*j*番目のサンプリングを $g_i^{(j)}$ とし

$$\hat{R} = \sqrt{1 + \frac{1}{n} \left(\frac{B}{W} - 1 \right)}$$

$$\left[\begin{array}{l} B = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{g}_i - \bar{\bar{g}})^2, W = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n (g_i^{(j)} - \bar{g}_i)^2}{n-1} \\ \bar{g}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_i^{(j)}, \bar{\bar{g}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{g}_i \end{array} \right]$$



$\hat{R} < 1.1$ であれば試行間に有意差が無く信頼性が高いと言える

* 文献[62]

本研究では3回同じ条件で試行し、信頼性の高い入力変数の組合せを選定

図 4.2.4-5 解析の信頼性(Gelman-Rubin 統計量)の評価方法の概要^[61]

広く使える情報量基準(WAIC: Widely Applicable Information Criterion)

- ・期待値が汎化損失と一致する情報量基準

$$WAIC = T_n + \frac{V_n}{n}$$

汎化損失 : 未知データについての推測の誤差 → 小さいほど良い

T_n (学習損失) : 学習データの推測の誤差

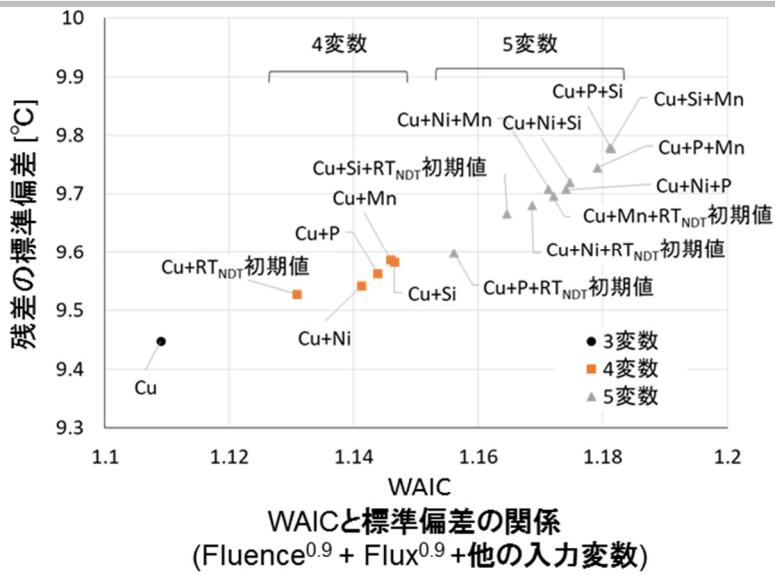
V_n (汎関数分散) : データを表す確率分布の分散

$$T_n = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \mathbb{E}_w[p(x_i|w)], \quad V_n = \sum_{i=1}^n \left\{ \mathbb{E}_w \left[(\log p(X_i|w))^2 \right] - \mathbb{E}_w[\log p(X_i|w)]^2 \right\}$$

$p(X_i|w)$ は入力変数の値(w)における関連温度移行量(X_i)の確率分布
 \mathbb{E}_w は入力変数の値(w)における平均値, n はデータの数

- ・実測データだけでなく、未知の周辺データに対する予測性も評価可能
→ 脆化への影響が大きい変数を適切に取り込むことが可能

図 4.2.4-6 予測性能の評価指標(WAIC)の概要^[61]



- 入力変数の数を3としたときに最もWAICが小さく、入力変数を増やしても、予測性は改善しない
- 材料の化学成分ではCuが関連温度移行量に最も寄与
- WAICが最小となる入力変数の組合せはFluence^{0.9}, Flux^{0.9}, Cu含有量

図 4.2.4-7 入力変数の組み合わせと WAIC の関係(BWR 監視試験データの評価結果)^[61]^{注 33)}

試行数を3とした時に信頼性が高く、WAICが小さい入力変数の組合せ*

データ区分	入力変数			残差の標準偏差(°C)
全データ	Fluence ^{0.6}	Cu, Ni		10.8
BWR	Fluence ^{0.9}	Flux ^{0.9} Cu		9.4
PWR	Fluence ^{0.7}	Cu, Ni, Si		8.4
BWR+PWR	Fluence ^{0.5}	Flux ^{1.0} Cu, Ni, RT _{NDT} 初期値		9.5
PWR+MTR	Fluence ^{0.7}	Cu, Si RT _{NDT} 初期値		13.5
母材	Fluence ^{0.5}	Flux ^{0.3} Cu, Ni, RT _{NDT} 初期値		9.4
溶接金属	Fluence ^{0.5}	Flux ^{0.3} Cu, Ni, P, Si RT _{NDT} 初期値		10.0
母材(MTR有)	Fluence ^{0.5}	Cu, Ni, RT _{NDT} 初期値		10.8
溶接金属(MTR有)	Fluence ^{0.5}	Flux ^{0.7} Cu, Ni, Si		11.3

詳細評価

*解析の信頼性をより高めるため、試行回数を10とした解析を実施中

データ区分ごと(全データ及びBWR,PWRデータ)においてWAICが最も小さくなった入力変数の組合せを用いて関連温度移行量の計算値および確信区間を評価

図 4.2.4-8 データ区分ごとの最適な入力変数の組み合わせ(暫定)

注 33) 図中のグラフ縦軸の「残差」は、遷移温度移行量(ΔT_{41f})の実測値と BNP 法による予測値の残差を意味する。

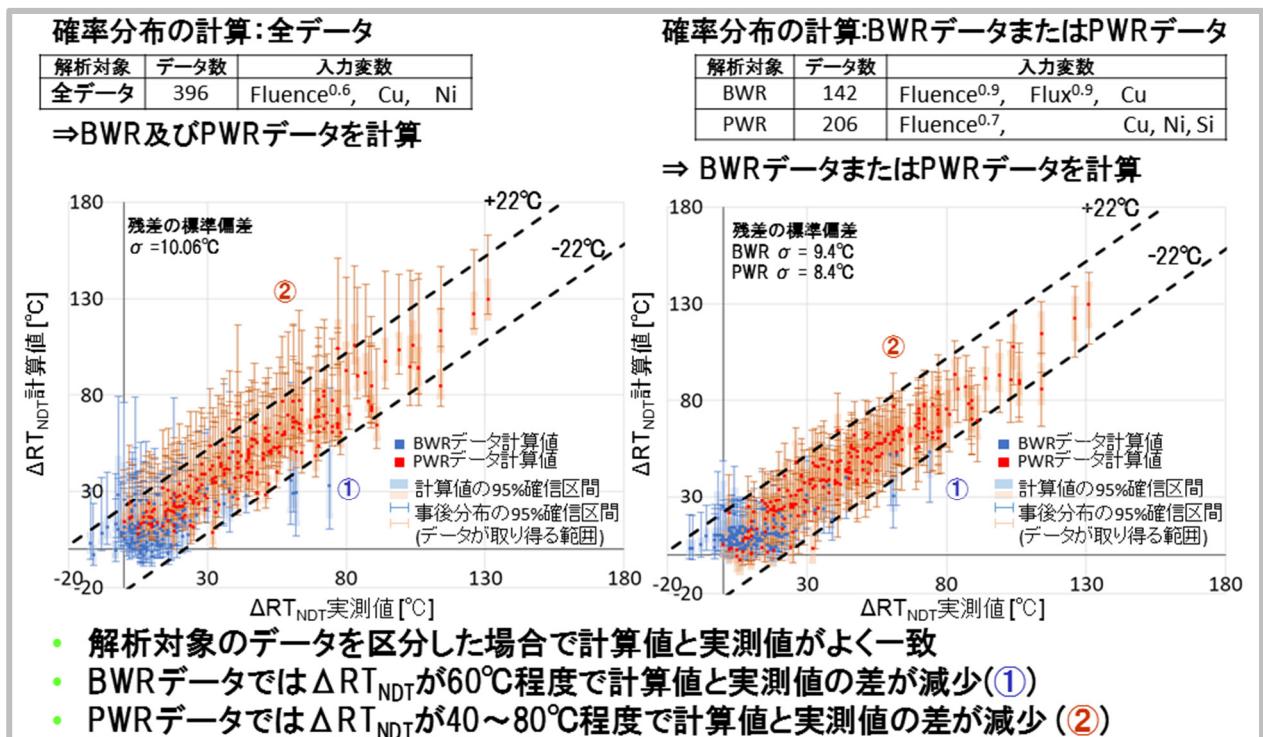
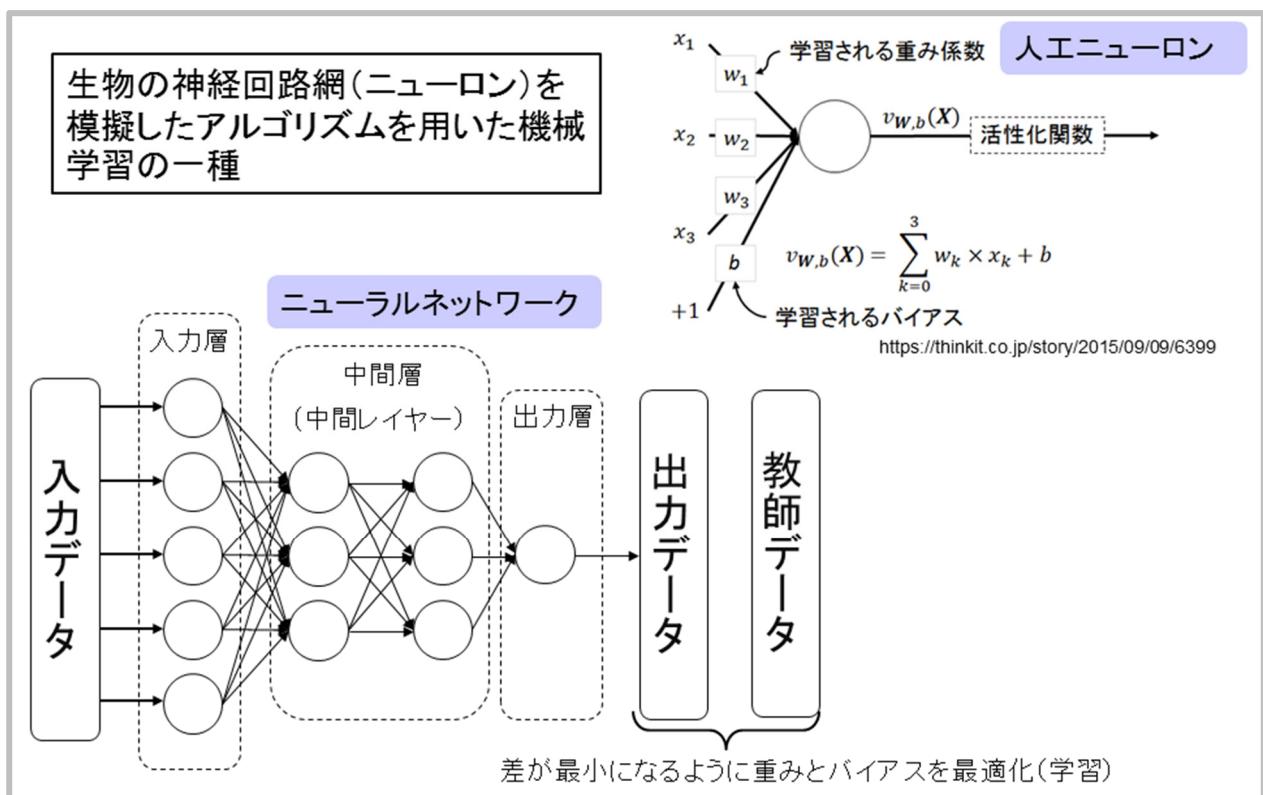
図 4.2.4-9 BNP 法による遷移温度移行量の計算値と実測値の関係^{注34)}

図 4.2.4-10 ニューラルネットワークの概要

^{注34)} 図中のグラフ縦軸の「 ΔRT_{NDT} 計算値」は BNP 法による遷移温度移行量(ΔT_{41J})の計算値を意味し、横軸の「 ΔRT_{NDT} 実測値」は遷移温度移行量(ΔT_{41J})の実測値を意味する。

4. 3 脆化予測法改定案の概要

本節では、まず4. 3. 1項に4. 2節に示した最新知見の調査結果を踏まえて産業界委員で検討した基本モデル式の見直しに向けた検討項目を示し、4. 3. 2項～4. 3. 5項に電中研の委員より提案された脆化予測法改定案について、基本モデル式の開発方針、ミクロ組織変化予測式改定案、遷移温度移行量予測式改定案、係数最適化及び予測性能の評価の順に示し、最後の4. 3. 6項に電気協会での JEAC4201 改定案の提案に向けて産業界委員で検討中の2020年1月時点での ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方を示す。

なお、IET 小委員会で電中研の委員より提示された最終的な脆化予測法改定案の説明資料を付録 3 に示す。

4. 3. 1 現行予測法の基本モデル式の見直しに向けた検討項目

4. 1. 2項に示した現行予測法について、IET 小委員会で提示された現行予測法に対する論点を(1)に示し、それに加えて4. 2節に示した最新知見の調査結果を踏まえて産業界委員で検討した見直し項目を(2)に示す。

(1) 現行予測法に対する論点

IET 小委員会において、東北大学の委員より、現行予測法の基本モデル式について、より照射脆化メカニズムと整合した脆化予測法に見直していく観点で論点となる事項が提示されたため、これらの事項を現行予測法の方法論、考慮する照射脆化メカニズム及び照射脆化メカニズムに関する研究における分析手法に分けて、それぞれ図 4.3.1-1～図 4.3.1-3 に示す。

現行予測法の適用に際しては、原子力規制委員会による技術評価結果を受けた要件の通り、原子炉圧力容器内面の照射量が $2.4 \times 10^{19} [\text{n/cm}^2, E > 1 \text{MeV}]$ を上回る場合、原子炉圧力容器の内面の照射量が既に試験された監視試験片の照射量を上回る前に次の監視試験を実施することが求められている。この要件を満たす限りにおいては、原子炉圧力容器が、監視試験結果が得られている照射量範囲を超えて運転されることはないと想定される。しかし、将来的に外挿評価にも適用できるように発展させていく上では、より照射脆化メカニズムと整合した基本モデル式としていくことが望ましい。それを実現する上で、パラメータとして Mn 含有量や P 含有量を考慮しないといった適用範囲を国内鋼材に限定したことによる前提条件も、必要に応じて見直していく必要があるとの提言があった(図 4.3.1-1 参照)。

また、現行予測法の基本モデル式で考慮する照射に伴うミクロ組織変化については、マトリックス損傷の遷移温度移行量への寄与が溶質原子クラスターに比べて小さい結果となることの妥当性、2007 年版の脆化予測法から現行予測法への改定に際して、基本モデル式の係数が見直された結果、(マトリックス損傷を核とする)照射誘起クラスターの重みが増大しているにも関わらずマトリックス損傷自体の寄与は小さいままという考え方の整合性や溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類以外のミクロ組織変化を考慮する必要性の有無といった点が論点として挙げられた(図 4.3.1-2 参照)。

また、現行予測法の基本モデル式について、係数の数が多く、式中に独立でない係数が多数存在する点も見直しの際の留意点として挙げられた(図 4.3.1-1 参照)。

さらに、照射脆化メカニズムに関する研究に関して、APT で得られる溶質原子クラスター体積率や溶質原子クラスター中の原子組成、溶質原子クラスター直径といった分析結果はデータ処理方法に依存することや、透過型電子顕微鏡による転位ループの観察については近年 WB-STEM 法(手法の概要は図 4.2.2-3 参照)などの新しい分析手法が開発され、より高い解像度で転位ループを観察できるようになってきており、そういった新しい手法を適用すればマトリックス損傷の寄与が小さいとする前提の妥当性を再検討できるとの提言があった。

上記の現行予測法に関する論点について、別の専門家委員より、APT により分析された Cu 原子クラスターの直径(体積)及び溶質原子クラスター中の原子組成などの性状変化と、照射脆化の度合いの関係が一定のばらつきを有している状況であることや APT による Cu 原子クラスターの性状変化の評価が相対評価であることに対する懸念の指摘があった。一方、Cu 原子クラスターの形成が照射脆化と何らかの相関があること、時々見られる照射脆化との間の相関性からのはずれは他の脆化因子の存在を示唆すること、他の脆化因子として転位ループ及び転位ループに偏析した Cu 原子以外の溶質原子(Mn, Ni, Si)のクラスターなどが挙げられること、Mn, Ni, Si 原子で構成される溶質原子クラスターは ΔT_{MD} 項として転位ループと共に取り込まれるべき等の意見が寄せられた。

なお、現行予測法については、電気協会における JEAC4201-2007[2013 年追補版]の公衆審査の際に、基本モデル式中の溶質原子クラスター数密度の計算式(式は図 4.1.2-3(1/2)参照)中の D_{Cu} について、式中で次元が一致していないとの指摘があったが、電気協会での審議の結果、公衆審査版の変更は不要との見解が示され^[63]、JEAC4201-2007[2013 年追補版]が制定された。その後、JEAC4201 の改定検討に際して改めて JEAC4201-2007[2013 年追補版]の基本モデル式の考え方は不適切であるとの指摘が電気協会に対してなされ、電気協会は、それらの指摘も踏まえ 2007 年版の基本モデル式を照射脆化に関する最新知見と整合した式に見直すと回答している^[64]。

- パラメータが多すぎること
 - 独立でないパラメータが存在する
 - 原理的には、脆化要因の数以上のパラメータを入れることは、過補正の可能性が生じるため好ましくない。
- 機構論に基づいているといえるのか？
 - 本来、「トレンドカーブ」は内挿が原則なので、機構論に基づく必要はない。
 - 現行のJEACの実用上最も大事なところはflux効果を入れているところ
 - 拡散係数の件のように、次元などが適切に考慮されていない。
 - 前回、トレンドカーブのアプローチとして、現象論式と発展方程式の二つを紹介していたが、本質的に両者に違いはない。
- Mn濃度やP濃度が入っていない：国内炉に適用を限定するという条件を付けることが、機構論に基づいたトレンドカーブとして(将来的に)正しい方向か？

図 4.3.1-1 現行予測法の基本モデル式に関する論点(方法論)

- 機構に関しては、後述のように、現行の考え方へ変更が必要でない(微修正でよい)とはいえない
- 本当にマトリックス損傷(MD)項は溶質原子クラスター(SC)項に比べて無視できるほど小さいのか？これらの複合体の形成は？
- 改訂版では「照射誘起項」の重みを大きくしているが、それは、無視できる程小さいMDに付随して存在するとしている。考え方へ矛盾していないか？
- その他
 - 本当にMD、SC以外は寄与しないのか？
 - 脆化機構としてSC項が体積率だけで記述できるとはどういう意味か？様々な因子が複雑に重ね合わさった結果？
 - ...

図 4.3.1-2 現行予測法の基本モデル式に関する論点(考慮する脆化機構)

- アトムプローブの限界
 - 分解能の限界により、微小なクラスター中の化学組成は確実に低く見積もっている。
 - レーザーモードだけでなく電荷パルスモードでも。
 - クラスター体積率はデータ解析方法に強く依存する
 - データ解析結果として得られるSCの体積率、組成、寸法は「相対値」として使うべき
 - 電荷パルスモードは破壊しやすい → 結果として、破壊しにくい領域を選択的に測定している可能性がある
- MDについても最新の手法による検討が必要
 - 電子顕微鏡法の最新のトレンドなど

図 4.3.1-3 照射脆化メカニズムに関する研究の分析手法に関する論点

(2) 現行予測法の基本モデル式の見直し項目

(1)の論点及び4. 2節に示した最新知見の調査結果を踏まえて、現行予測法の基本モデル式について、見直しが必要と考えられる項目について産業界委員で検討した結果を示す。

a. 見直しにおいて考慮する照射に伴うミクロ組織変化

現行予測法の基本モデル式は、照射により形成される溶質原子クラスター及びマトリックス損傷(図 4.1.2-2 参照)が転位の運動の障害物となり、硬化を生じさせるとの前提で定式化されている。4. 2. 2項に示した通り、一部、溶質原子クラスターの形成以外の要因で硬化が生じている可能性(図 4.2.2-1 参照)や、モデル合金において Mn 原子を起点とするマトリックス損傷によると推定される顕著な硬化(図 4.2.2-11 参照)が確認された事例は報告されているが、現時点では国内の原子炉圧力容器鋼材において明確に確認されているわけではなく、直ちに基本モデル式で考慮できるほどの系統だった知見とはなっていないと考えられる。脆化予測法は国内の原子炉圧力容器鋼材の化学組成や照射条件に応じた平均的な脆化傾向を再現することを目的とするものであることを踏まえると、今回の見直しでは4. 2. 1項に示した通り溶質原子クラスターについては APT の分析結果のデータベースが拡充され、その傾向分析結果から溶質原子クラスター体積率の平方根が一次近似として遷移温度移行量に比例する傾向が確認されることを踏まえて、溶質原子クラスターに関する指標の予測性に着目することが有効と判断した。

また、図 4.2.2-7 に示す通り、近年ミクロ組織分析技術の進歩により転位ループと溶質原子クラスターが同一位置に存在し、複合体を形成している可能性が示され、この複合体をマトリックス損傷と位置付けるか溶質原子クラスターと位置付けるかの論点はあるものの、上記の通り溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の線形の相関を再現する上で、複

合体については溶質原子クラスターに分類することが有効と判断した。この点を踏まえて、今回の基本モデル式の見直しでは、マトリックス損傷は照射により形成されるが、同時に照射誘起クラスターの形成で消費されるとの現行予測法の考え方を引き続き踏襲することとした。また、現行予測法では図 4.1.2-5 の通りマトリックス損傷は主として転位ループを想定しているが、転位ループに溶質原子が析出した複合体は溶質原子クラスターと位置付けていることを踏まえ、今回の見直しではマトリックス損傷は転位ループに限らずより一般的に APT で測定されない照射損傷の総称と位置付けることとし、引き続き照射脆化の第二要因として考慮することとした。

粒界脆化(非硬化型脆化)については、一部 P 含有量が比較的多い国外の鋼材では粒界破面が確認されているものの、国内鋼材の P 含有量は 0.02wt.%以下と低い。また、図 4.2.2-30 に示したように、国内 PWR プラントの中でも P 含有量が比較的高い母材及び溶接金属の監視試験片並びに比較標準材に対して行われたオージェ電子分光分析による粒界偏析元素分析の結果、P の粒界偏析量には顕著な照射速度依存性が見られず、試験炉照射材を対象とした既往研究では、P 含有量が 0.02wt.%以下かつ P の粒界偏析量の変化 ΔC_P^{gb} が 0.12 以下の範囲では、粒界脆化の起こる可能性が低かったことから、今回の見直しでは、引き続き粒界脆化による非硬化型脆化を考慮しないこととした。

以上の結果を踏まえて、今回の基本モデル式の見直しに際しては、照射に伴うミクロ組織変化として、現行予測法と同様に溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類を考慮することとした。

b. 考慮するパラメータ

現行予測法では入力パラメータとして、化学成分(Cu 含有量及び Ni 含有量)及び照射条件(中性子束、照射量及び照射温度)を考慮している。図 4.2.3-2 に示すように国外の脆化予測法では化学成分として他に Mn 含有量や P 含有量を考慮しているものがあること、図 4.2.4-8 に示すように国内照射データの統計解析に関する研究において一部データセットで照射脆化に寄与する因子として Si 含有量が抽出されたことを踏まえて、基本モデル式の見直しに際しては、化学成分として新たに Mn 含有量及び Si 含有量の考慮要否を検討することとした。P 含有量については、a.に示したように国内鋼材においては非硬化型脆化が顕在化しないと考えられていること、P 含有量は Cu 含有量と相関があり、国内鋼材では P 単独の影響を抽出することが困難なことから、引き続きパラメータとして考慮しない。

a. 及び b.に示した見直し検討項目を以下にまとめる。

- ・ 現行予測法における照射により形成される溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類が転位の運動の障害物となり硬化型脆化を生じさせるとの想定を踏襲する。
- ・ 現行予測法で考慮している溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の間の線形の相関を再現する方針を踏襲するが、APT の分析結果のデータベースの傾向分析結果を踏まえ、溶質原子クラスターに関する指標の予測性に着目して基本モデル式の見直しを検討する。

- ・マトリックス損傷については、APT で観察されない照射損傷の総称と定義し、現行予測法と同様に脆化の第二要因として考慮する方針を踏襲する。また、マトリックス損傷は照射とともに形成され続けるが、同時にその一部は照射誘起クラスターの形成で消費されその分は陽には存在しないとの想定を踏襲する。
- ・現行予測法における粒界脆化による非硬化型脆化を考慮しないとの方針を踏襲する。
- ・化学成分については、現行予測法における P 含有量を考慮しないとの方針を踏襲し、新たに Mn 含有量と Si 含有量の考慮要否を検討する。

以上の検討結果を踏まえて、脆化予測法改定案の基本モデル式の開発方針を4. 3. 2項に示す。

4. 3. 2 脆化予測法改定案の基本モデル式の開発方針

4. 3. 1項の検討項目を踏まえて、電中研の委員により、脆化予測法改定案が提案された。本項では、脆化予測法改定案の基本モデル式の開発方針を示す。

脆化予測法改定案ではミクロ組織変化の予測及びミクロ組織変化に伴う遷移温度移行量の予測の2つの予測からなる現行予測法の枠組みは維持しながら、それぞれの予測を行う基本モデル式を見直すこととした。脆化予測法改定案の基本モデル式の開発方針を図 4.3.2-1 に示す。また、ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式それぞれに関する検討項目を図 4.3.2-2 に、それぞれの式の開発の流れを図 4.3.2-3 に示す。

ミクロ組織変化予測式については APT 分析により得られたデータの傾向分析を踏まえて、現行予測法をもとに溶質原子クラスター形成の傾向を再現できる相関式を構築し、予測残差の分析を踏まえて化学組成の影響等を見直すこととした。また、現行予測法は基本モデル式が微分方程式で与えられるため、脆化量の算出に数値積分が必要となるが、改定案においては、ユーザの利便性向上の観点から、数値積分を行わなくとも脆化量を算出できるよう微分方程式から求めた近似式を新たに提案する。遷移温度移行量予測式については、溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量との間の線形の相関を再現することとし、現行予測法の基本モデル式の考え方を踏襲して、照射により形成される溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類が転位の運動の障害物となり脆化に寄与するモデルを採用する。一方、初期降伏応力をもたらす要因である照射前から存在する炭化物や他の析出物及び転位についても転位運動の障害物となり、照射硬化にも間接的に寄与すると考えられることから、初期降伏応力の考慮要否を検討することとした。

脆化予測法改定案のミクロ組織変化予測式で考慮する溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の定義を図 4.3.2-4 に示す。溶質原子クラスターについては、現行予測法と同様に APT で観察される溶質原子クラスターを照射促進クラスター及び照射誘起クラスターの 2 種類に分類するとの考え方を採用した。また、マトリックス損傷については、APT で観察されない照射損傷の総称と定義し、現行予測法と同様に照射と共に形成され続けるが、同時にその一部は照射誘起クラスターの形成で消費されその分は陽には存在しないと想定して定式化した。APT により得られた最新のデータについて、溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関を図 4.3.2-5 に整理した。この図の左のグラフは炉型を問わず最新の国内全照射データをプロットしたものであるが、PWR プラント及び BWR プラントの照射データ並びに試験炉の照射データのいずれも右の既往研究の試験炉の照射データのグラフ^[17]と同様に溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の間に線形の相関が認められることがわかる。

次に、現行予測法の基本モデル式により溶質原子クラスターに関する各指標(溶質原子クラスター体積率、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度)を予測した結果を図 4.3.2-6 に示す^[65]。基本モデル式の係数最適化に際してその予測性を考慮している溶質原子クラスター体積率の平方根については比較的良好に予測できているが、それ以外の指標については、溶質原子クラスター平均体積は全体的に予測誤差が大きい傾向、溶質原子クラスター数密度は $1 \times 10^{24} [\text{m}^{-3}]$ 以上で過少に予測する傾向、マトリ

マトリックス Cu 濃度は 0.04wt.%以上で過少に予測する傾向が見られた。そこで今回のミクロ組織変化予測式の開発では、特に溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度、マトリックス Cu 濃度の予測性の改善を目指した。

脆化予測法改定案の基本モデル式の開発方針を以下にまとめる。

- ・ミクロ組織変化の予測及びミクロ組織変化に伴う遷移温度移行量の予測の2つの予測からなるとの現行予測法の枠組みを維持して、それぞれの式の見直しを検討する。
- ・ミクロ組織変化予測式については、現行予測法の溶質原子クラスターに関する指標の予測性を踏まえ、特に溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度、マトリックス Cu 濃度の予測性の改善を目指す。
- ・マトリックス損傷の数密度の式については、遷移温度移行量の予測残差の傾向分析を踏まえて、化学組成の影響等を見直す。
- ・遷移温度移行量予測式については、現行予測法の基本モデル式の考え方を踏襲するが、初期降伏応力の考慮の要否について検討する。
- ・現行予測法のように数値積分を行わなくても脆化量を算出できるよう微分方程式の近似解を導出する。

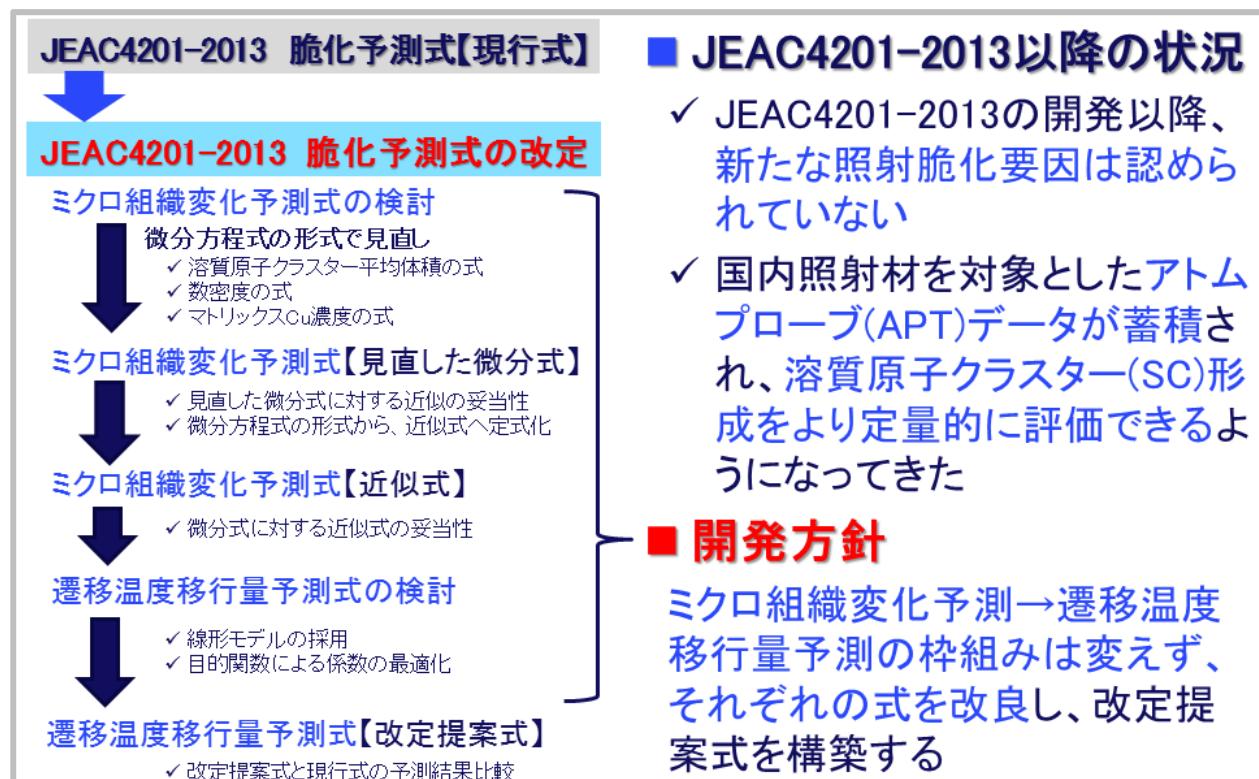


図 4.3.2-1 脆化予測法改定案の開発方針

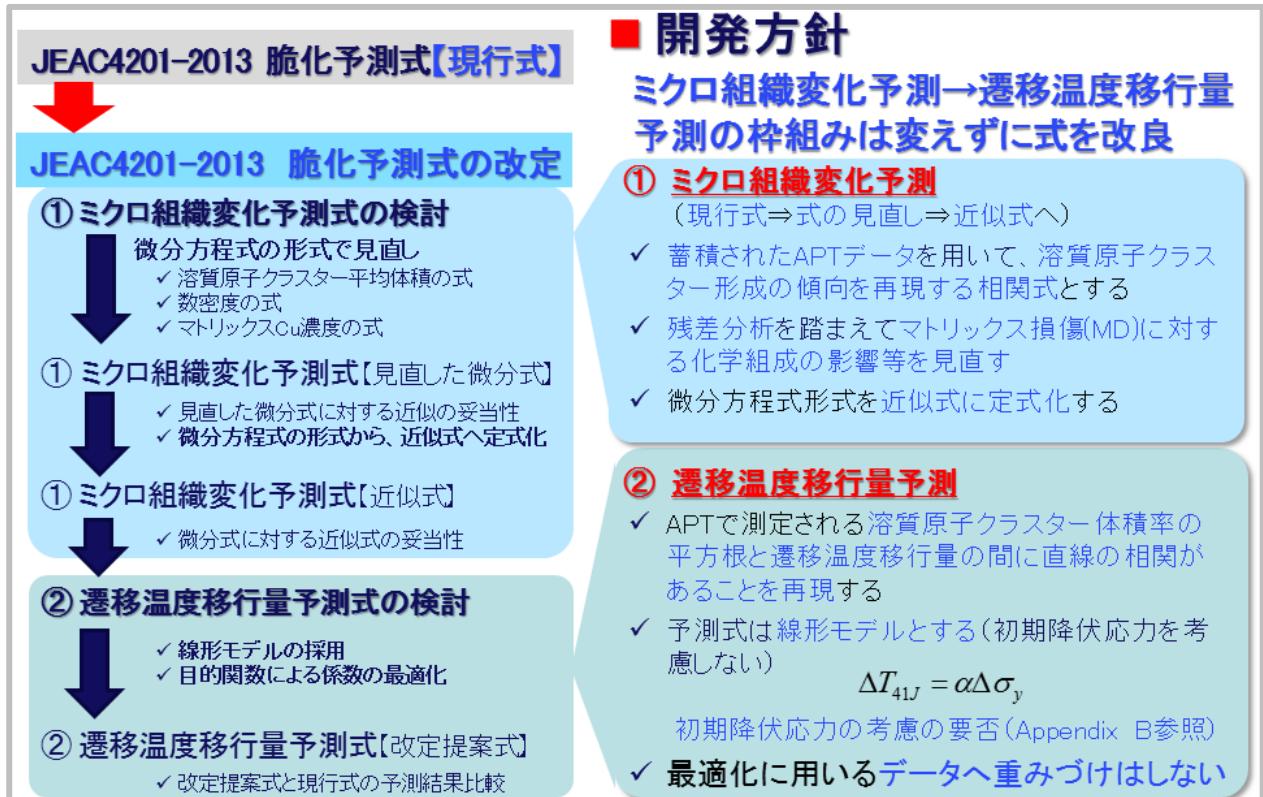


図 4.3.2-2 脆化予測法の開発に際しての検討項目

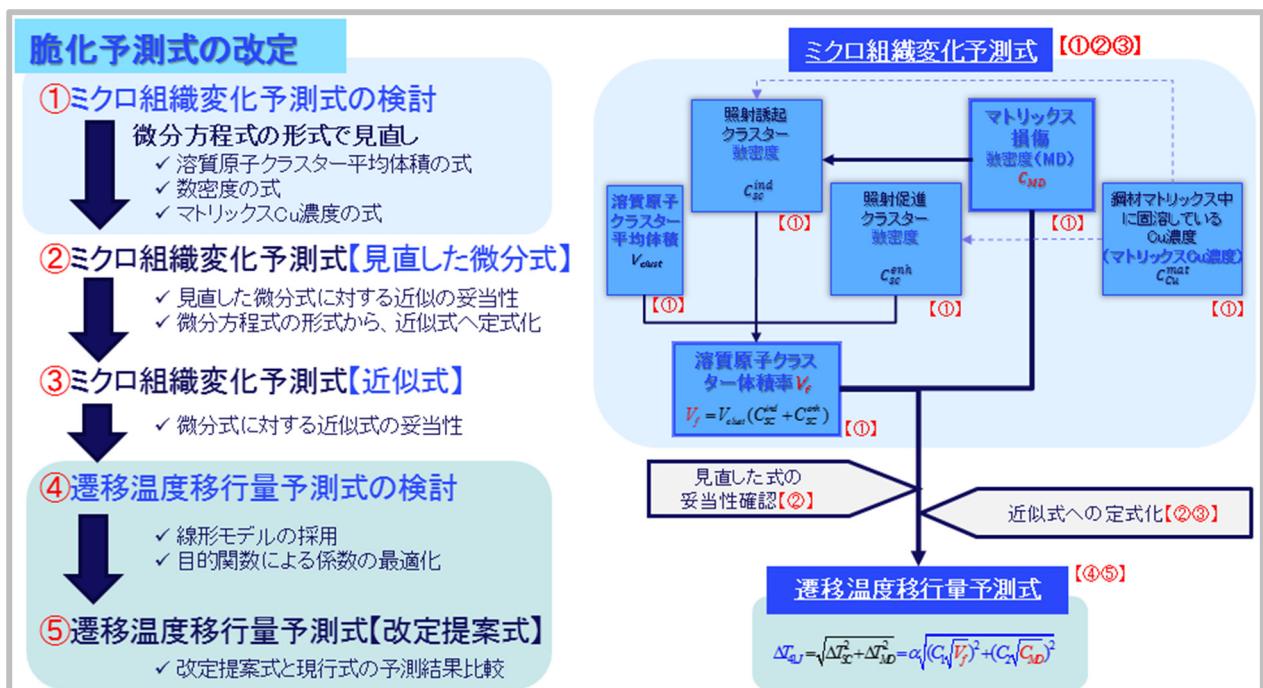


図 4.3.2-3 ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の開発の流れ

■ 溶質原子クラスター

- APTで測定される溶質原子クラスターを指す。これを単に「溶質原子クラスター」と呼ぶ
- 2種類の溶質原子クラスターを考える
 - ✓ 照射促進クラスター(照射促進クラスターの式)
中性子照射により形成が促進される均一核生成による溶質原子クラスター
 - ✓ 照射誘起クラスター(照射誘起クラスターの式)
中性子照射により形成される「マトリックス損傷」を核として形成される溶質原子クラスター

■ マトリックス損傷(MDの式)

- APTで測定されない照射損傷を「マトリックス損傷」と総称し、脆化の第2要因として考慮
- マトリックス損傷は、照射とともに形成され続けるが、同時にその一部はクラスター形成で消費され、その分は陽には存在しないと想定してモデル化する

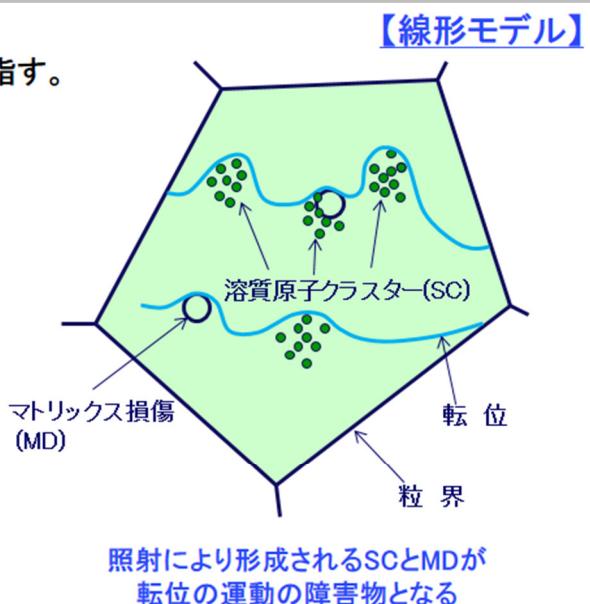


図 4.3.2-4 脆化予測法の開発において考慮する照射脆化メカニズム

溶質原子クラスター形成と脆化量の関係

- APT測定・解析で検出された溶質原子クラスターの体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度移行量(ΔT_{41J})の間に線形の相関が認められる

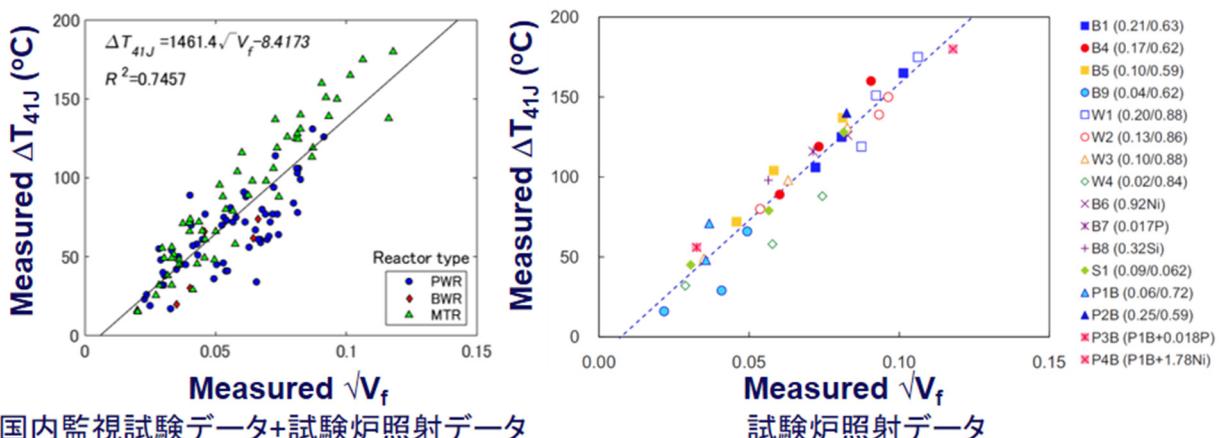
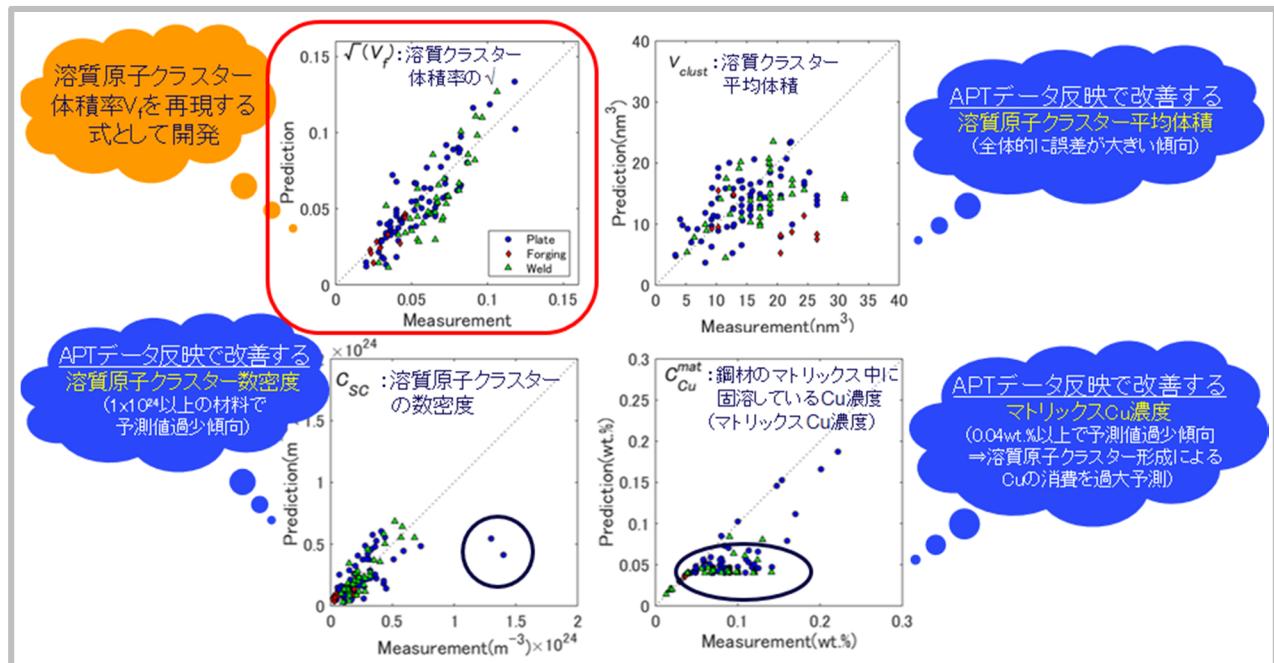


図 4.3.2-5 溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の相関^{注35)}

注35) 図中の右側のグラフは、ASTM International 社の許可を得て文献[17]のグラフを転載した。Reproduced, with permission from the Journal of ASTM International, Vol.6, Issue 7, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

図 4.3.2-6 現行予測法による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果^[65]

4. 3. 3 ミクロ組織変化予測式改定案

4. 3. 2 項に示した脆化予測法改定案の開発方針を踏まえて検討されたミクロ組織変化予測式改定案を本項に示す。

ミクロ組織変化予測式の開発に際して考慮した溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の定義とミクロ組織変化予測式の個々の式の関係を図 4.3.3-1 に示す。ミクロ組織変化予測式の見直しは、図 4.3.2-2 の検討項目を踏まえて、現行予測法のミクロ組織変化予測式^[16,18,19]の個々の式(図 4.3.3-2 の①～⑥)をスタートとして、それぞれの式について APT 分析で得られた溶質原子クラスターに関する指標との相関を確認しながら、パラメータや関数形を決定した。さらに、得られたそれぞれの微分方程式で溶質原子クラスターに関する指標を良好に予測できることを確認した上で、仮定を置いて解いた微分方程式の近似解をミクロ組織変化予測式改定案とした。

見直し後の微分方程式形式のミクロ組織変化予測式^[65]を図 4.3.3-3 に、式中で用いられる記号を図 4.3.3-4 中の表にまとめる。以降に、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度並びにマトリックス Cu 濃度のそれぞれについて、見直した式の変更点を示す。

まず、溶質原子クラスター平均体積について、現行予測法で予測した結果(式は図 4.3.3-2 の①参照)を図 4.3.3-5 に示す。これを、図 4.3.3-6 に示すように溶質原子クラスター平均体積が Cu 含有量に伴い増加傾向となることや、溶質原子クラスター平均体積には照射量及び中性子束の両者が寄与するとの APT データの傾向分析結果を踏まえて式を見直した。図 4.3.3-7 に見直した式を示す。さらに見直した溶質原子クラスター平均体積の式により予測した結果を図 4.3.3-8 に示す。溶質原子クラスター平均体積の式の見直しにより APT データを良好に予測できるようになったことがわかる。

次に、照射誘起クラスター、照射促進クラスター及びマトリックス損傷の数密度の式(式は図 4.3.3-2 の②～④参照)について、見直し方針を図 4.3.3-9 に示す。これらの式では、化学組成、中性子束及び照射温度の影響について ASTM E900-15 で用いられている関数形を参考に、式を見直すこととした。見直しの結果得られた照射誘起クラスターの式、照射促進クラスターの式及びマトリックス損傷の式を図 4.3.3-10 にそれぞれ示す。このうち、照射促進クラスターの数密度の式については、新たにパラメータとして Si 含有量及び Mn 含有量を考慮している。照射促進クラスター数密度の予測残差に対する Si 含有量の影響を評価した結果を図 4.3.3-11 に示す。見直した式において Si 含有量をパラメータとして考慮することにより予測残差における Si 含有量に対する依存性が認められなくなり、予測式に Si の影響を適切に取り込んでいることがわかる。

最後に、マトリックス Cu 濃度について現行予測法で予測した結果(式は図 4.3.3-2 の⑤参照)を図 4.3.3-12 に示す。Cu 含有量が 0.04wt.%以上においてマトリックス Cu 濃度は過少に予測されており、現行予測法では溶質原子クラスター形成により、実際よりもマトリックス中の Cu が過大に消費されるモデルとなっていることが示唆される。そこで、溶質原子クラスター形成に消費される Cu の量を検討するために、溶質原子クラスター 1 つ当たりに含まれる Cu の平均原子数(=マトリックス Cu 濃度から溶質原子クラスター形成により消費される Cu の量)の

照射に伴う変化について分析した結果を図 4.3.3-13 に示す。この結果から、溶質原子クラスター中の Cu の量は鋼材の Cu 含有量が高いほど高くなること、また照射が進んでも溶質原子クラスター中に含まれる Cu の原子数はほとんど変化しないことがわかる。次に、照射温度及び中性子束の影響について分析した結果を図 4.3.3-14 に示す。溶質原子クラスター中の Cu 原子数は照射温度及び中性子束の影響を受けることがわかる。分析結果を踏まえて見直したマトリックス Cu 濃度の式を図 4.3.3-15 に示す。式を見直した結果、現行の式で 0.04wt.%以上で過少に予測される傾向(図 4.3.3-12 参照)が大きく改善した。

以上の見直し後の微分方程式形式のミクロ組織変化予測式について、式に含まれるフィッティング係数を APT 分析で得られた溶質原子クラスターに関する各指標(溶質原子クラスター体積率、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度、マトリックス Cu 濃度)の実測値に対して最適化を行い、予測値との比較を行うことで式の妥当性確認を行なった。図 4.3.3-16 に係数最適化の考え方を示す。係数のうち、マトリックス Cu 濃度に関する係数及び溶質原子クラスター平均体積に関する係数については、それぞれの APT データに対して個別に最適化して設定した。それ以外の係数については、溶質原子クラスター体積率の予測残差の二乗和を目的関数とし、これが最小となるよう最適化して決定した。溶質原子クラスター体積率の平方根、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度について、実測値と予測値を比較した結果を図 4.3.3-17 の下段に示す。上段に示した現行予測法による結果と比較して、特に溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度の予測性が改善した。

次に、見直しにより得られた微分方程式形式のミクロ組織変化予測式について、近似解を導出する検討を行なった。近似解を導出する際に用いた仮定を図 4.3.3-18 に示す。APT データの傾向分析から、照射誘起クラスターの数密度の式においてマトリックス Cu 濃度は Cu 含有量に概ね比例すること、マトリックス Cu 濃度の式においてマトリックス Cu 濃度は照射促進クラスターの析出のみで消費されることを仮定し解を導出した。導出したミクロ組織変化予測式(以下、近似式)を図 4.3.3-19 に示す^[65]。さらに溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果を、微分方程式形式のミクロ組織変化予測式と近似式で比較して図 4.3.3-20 に示す。近似式により微分方程式形式のミクロ組織変化予測式とほぼ同等の予測ができることが確認できる。

近似式について、今回最適化対象とした APT データのデータベースの照射量範囲($\leq 1.3 \times 10^{20} [\text{n}/\text{cm}^2, E > 1 \text{MeV}]$)における溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度並びにマトリックス Cu 濃度の時間発展の傾向を図 4.3.3-21 に示す。データベースの照射量範囲では、照射誘起クラスターの数密度は照射時間に応じて単調増加すること、それ以外の指標については一定値に飽和する傾向で定式化されていることがわかる。

これらの検討から、図 4.3.3-19 に示した近似式を、脆化予測法改定案のミクロ組織変化予測式とすることは妥当と判断される。ミクロ組織変化予測式の見直し検討結果を以下にまとめると。

- APT 分析により得られた溶質原子クラスターのデータベースの傾向分析結果を踏まえて、現行予測法の微分方程式を基に溶質原子クラスター形成の傾向を再現できる相関式を構

築し、特に溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度、マトリックス Cu 濃度の予測性が改善した。

- ・マトリックス損傷の数密度の式について、予測残差の分析結果を踏まえて化学組成の影響等を見直した。
- ・上記の微分方程式について、2 つの仮定(照射誘起クラスターの数密度の式においてマトリックス Cu 濃度は Cu 含有量に概ね比例すること、マトリックス Cu 濃度の式においてマトリックス Cu 濃度は照射促進クラスターの析出のみで消費されること)において解を導出し、得られた近似式が、元の微分方程式と同程度の溶質原子クラスターに関する指標の予測性を確保できることを確認したことから、この式をミクロ組織変化予測式改定案として提案する。

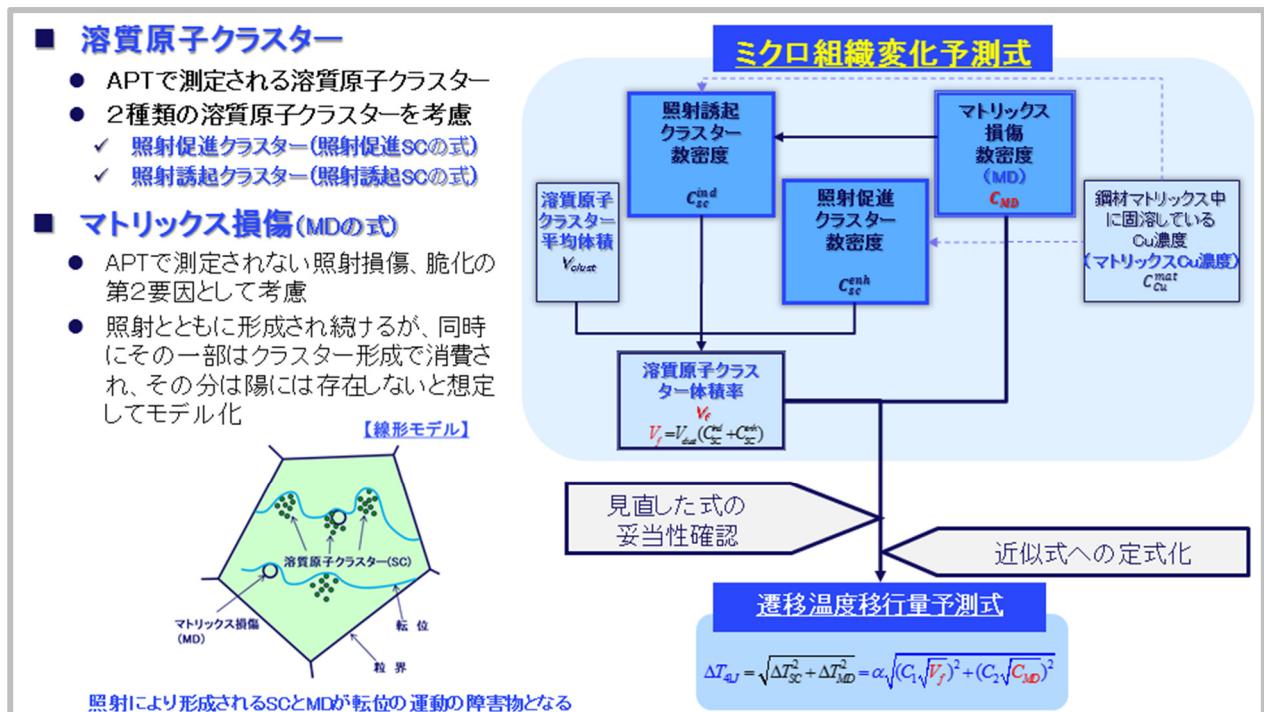
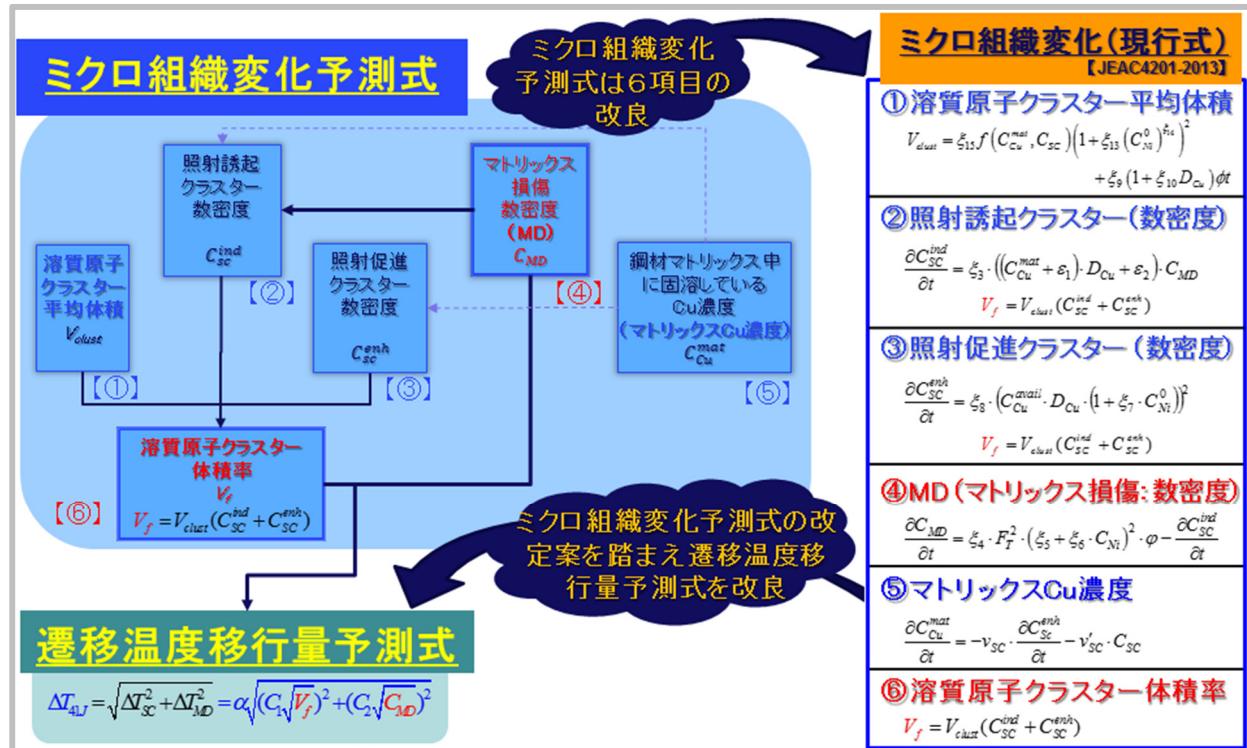


図 4.3.3-1 ミクロ組織変化予測式において考慮する照射脆化メカニズムと個々の式の関係

図 4.3.3-2 現行予測法のミクロ組織変化予測式^[16,18,19]

JEAC4201-2013現行式		見直した式(微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1)	溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{15} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$	$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{\left(1 + \frac{\zeta_4}{T}\right)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288}\right)} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$
(2)	照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$
	照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avai} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}}\right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}}\right)^{a_9}\right\} \left\{1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}}\right)^{a_{11}}\right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_{12}} \times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}}\right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$
	MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}}\right)^{b_3}\right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}}\right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$
(3)	マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -\nu_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - \nu'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}}\right)^{d_4}\right\} \left\{1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}}\right)^{d_7}\right\} \left\{1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}}\right)^{d_{10}}\right\} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

図 4.3.3-3 見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式形式)^[65]

記号と名称		
記号	データベースでの平均値	名称(単位)
ϕt	—	照射量 (n/cm ² , E>1MeV)
ϕ	ϕ^{mean}	中性子束 (n/(cm ² · s), E>1MeV)
t	—	照射時間(s)
C_{Cu}^0	$C_{Cu}^{0,mean}$	鋼材のCu濃度 (wt. %)
C_{Ni}^0	$C_{Ni}^{0,mean}$	鋼材のNi濃度 (wt. %)
C_{Si}^0	$C_{Si}^{0,mean}$	鋼材のSi濃度 (wt. %)
C_{Mn}^0	$C_{Mn}^{0,mean}$	鋼材のMn濃度 (wt. %)
T_{irrad}	T_{irrad}^{mean}	照射温度(°C)

最適化により決定する係数	
記号	名称
a_i ($i=1 \sim 14$)	溶質原子クラスターの数密度に関する係数
b_j ($j=1 \sim 5$)	マトリックス損傷の数密度に関する係数
d_k ($k=1 \sim 10$)	マトリックスCu濃度に関する係数
ξ_l ($l=1 \sim 9$)	溶質原子クラスター体積に関する係数
C_1, C_2	降伏応力の増加に関する溶質原子クラスターとマトリックス損傷の寄与を示す係数

図 4.3.3-4 ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の記号の説明

【対象: JEAC4201-2013現行式】溶質原子クラスター平均体積の式

$$V_{clust} = \xi_{15} \cdot f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \cdot \left(1 + \xi_{13} \cdot (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}} \right)^2 + \xi_9 \cdot (1 + \xi_{10} \cdot D_{Cu}) \cdot \phi t$$

V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 ξ : 現行式における最適化係数
 C_{Cu}^{mat} : 鋼材のマトリックス中に固溶しているCu濃度(マトリックスCu濃度)
 C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度
 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度
 D_{Cu} : Cuの拡散係数
 ϕt : 照射量

課題: JEAC4201-2007開発時点

⇒ APT (Atom Probe Tomography) データ数が限られていた

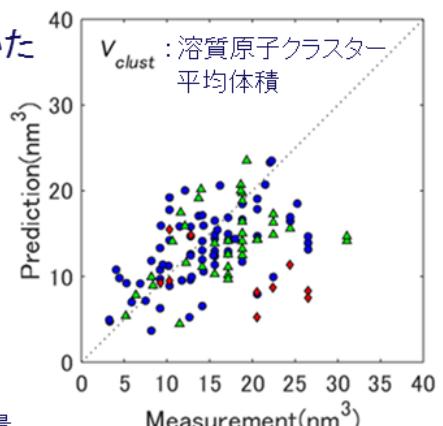
↓
《今回の見直し》

✓ 現在100点以上のAPTデータを取得

↓
APTデータを再現できる式に見直し

① 低照射領域での溶質原子クラスター体積の見直し
(バルクCu濃度)

② 溶質原子クラスター体積に対するバルクCu濃度、照射量
及び照射時間の効果の考慮



【JEAC4201-2013現行式】

図 4.3.3-5 溶質原子クラスター平均体積の式の見直し方針

APTデータを再現できる式への見直し

- ① バルクCu濃度: 低照射領域の溶質原子クラスター サイズ(平均体積)の見直し
溶質原子クラスター平均体積はバルクCu濃度に伴って増加傾向
- ② 照射量および照射時間の溶質原子クラスター体積に対する効果の考慮
溶質原子クラスター平均体積の増加には照射量と照射時間の両者が寄与

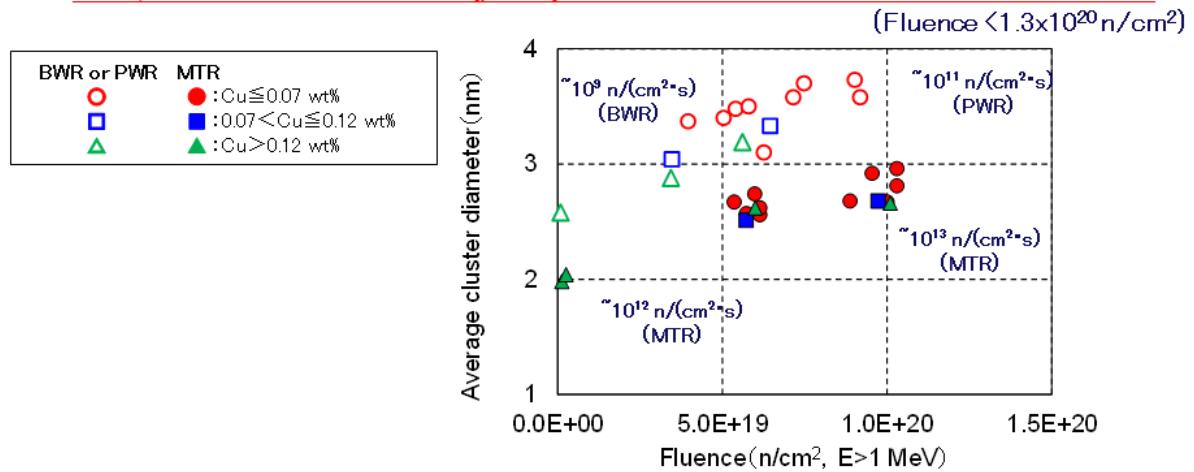


図 4.3.3-6 溶質原子クラスターの平均直径の照射量依存性

《係数最適化》 見直した溶質原子クラスター平均体積の式

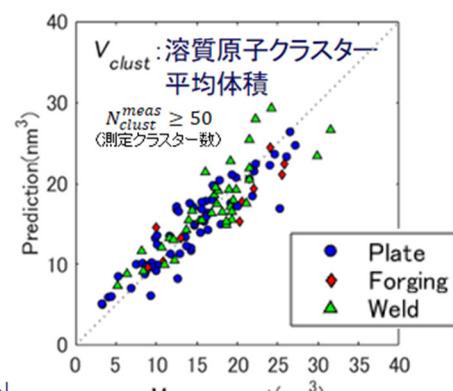
$$\begin{aligned}
 V_{clust} &= A + B_1 \phi t + B_2 t \\
 &= (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}} \right) \frac{1 + \frac{\zeta_4}{T_{irrad}}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \frac{t}{10^9}
 \end{aligned}$$

C_{Cu}^0 : 鋼材の Cu 濃度
 C_{Ni}^0 : 鋼材の Ni 濃度
 C_{Si}^0 : 鋼材の Si 濃度
 T_{irrad} : 照射温度
 $\zeta_i (i=1-9)$: 溶質原子クラスター体積に関する係数

係数 $\zeta_1 \sim \zeta_9$ を APT データ(平均の溶質原子クラスター体積)を用いてフィッティング

\downarrow
 $Obj = \frac{\sum (V_{clust}^{pred} - V_{clust}^{meas})^2}{\sum (V_{clust}^{meas})^2}$
上付添字 pred: 予測値 meas: 測定値

が最小になるように最適化



【注】本図は APT データのみで最適化した結果であり、最終の脆化予測法改定案による結果とは異なる

図 4.3.3-7 見直し後の溶質原子クラスター平均体積の式

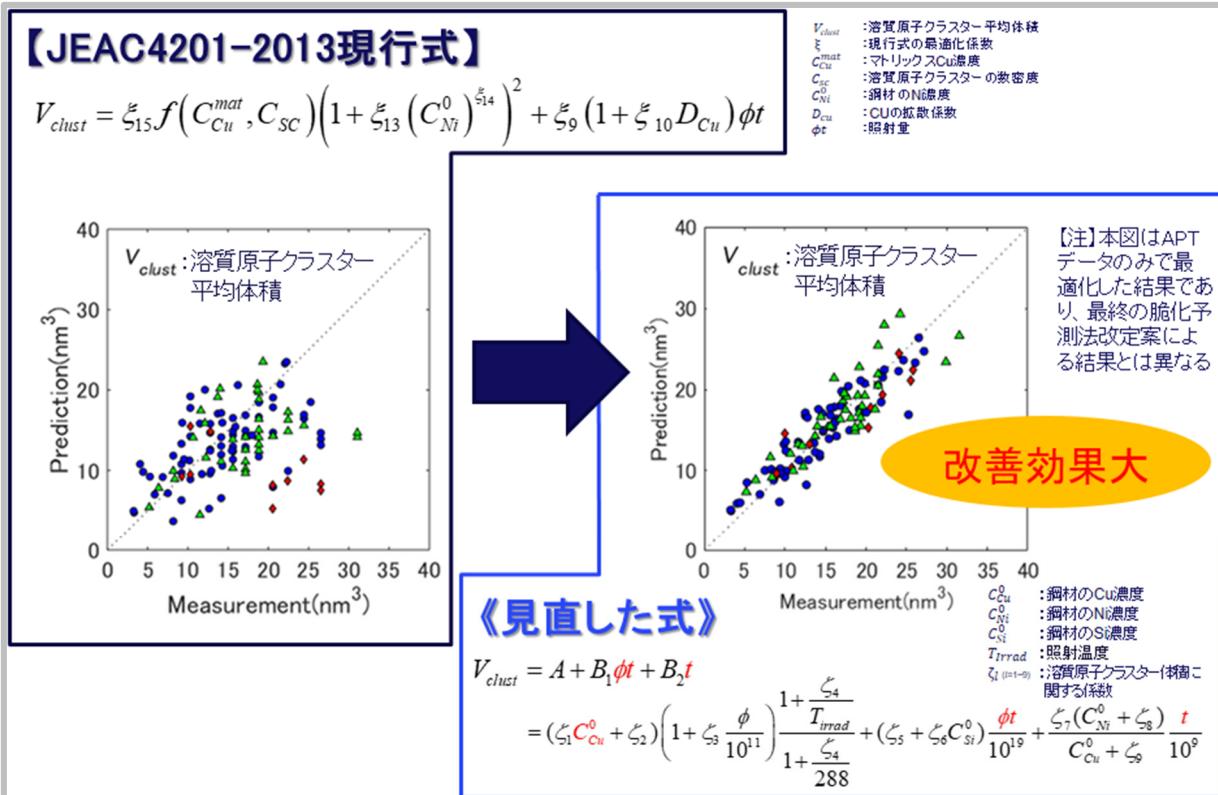


図 4.3.3-8 見直し後の式による溶質原子クラスター平均体積の予測結果

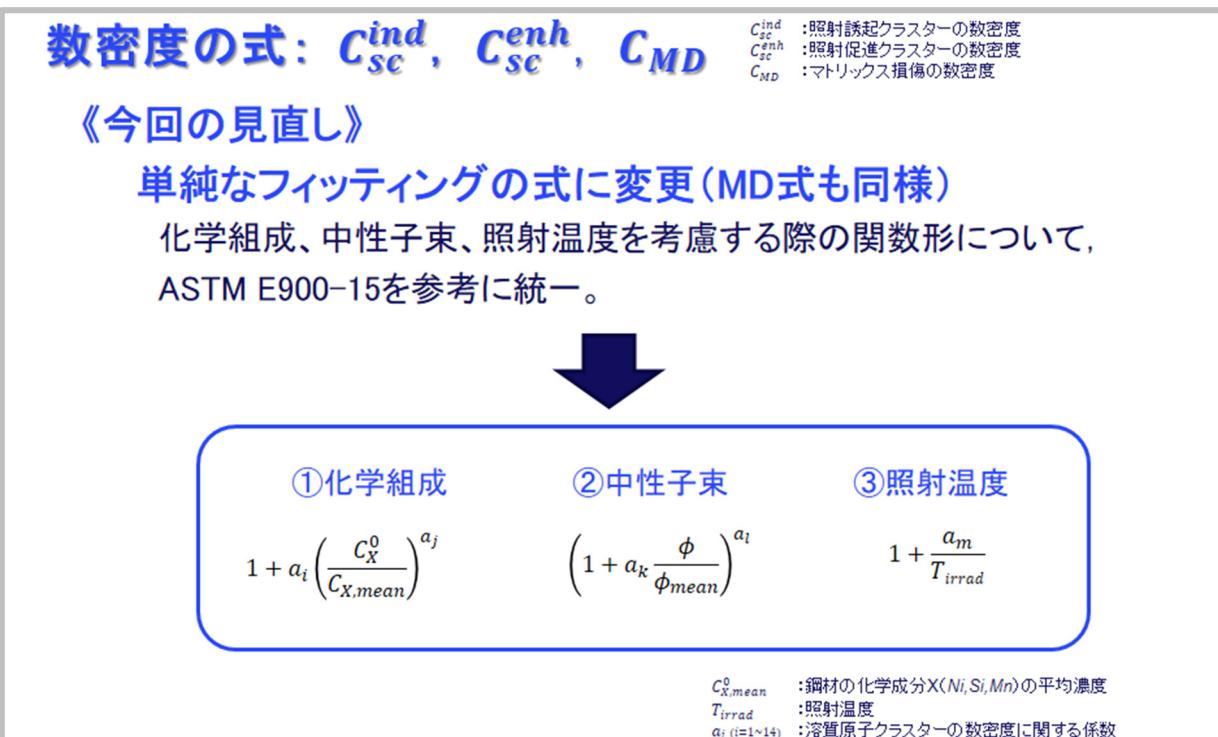


図 4.3.3-9 溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度の式の見直し方針

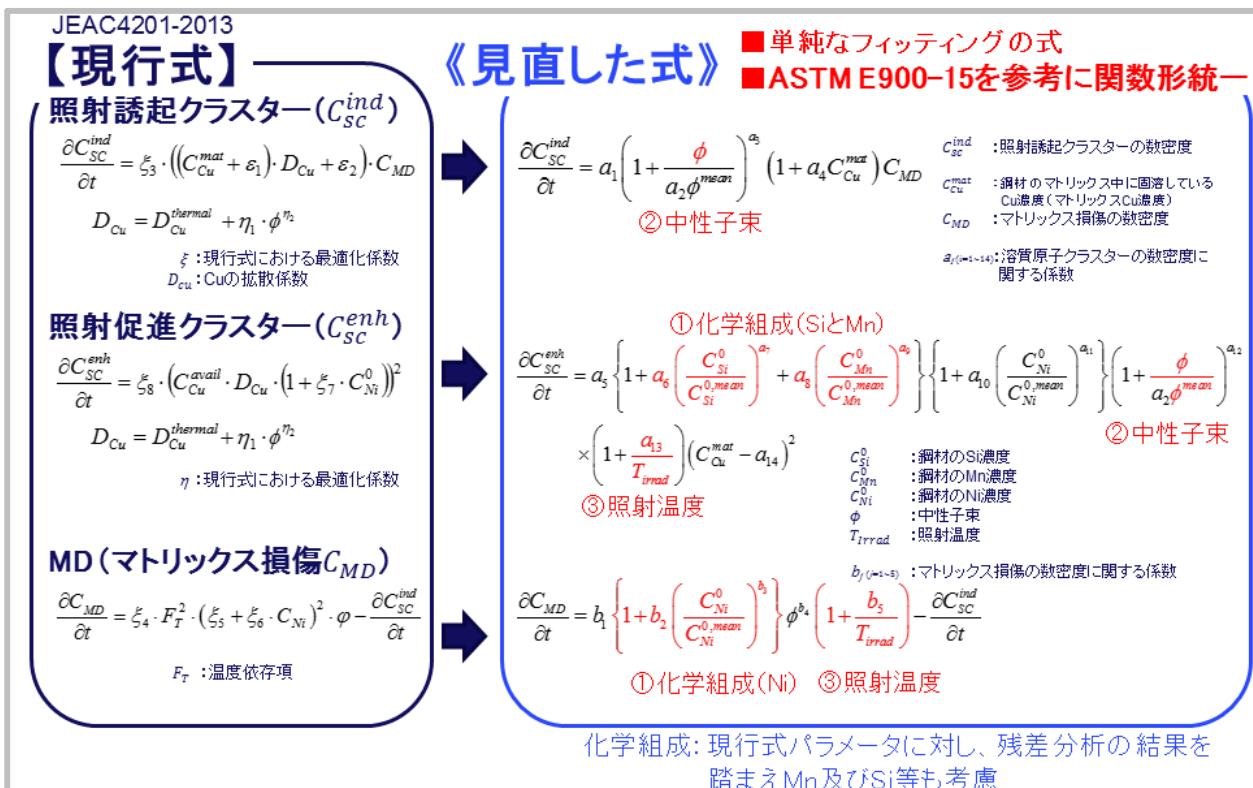


図 4.3.3-10 溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度の式の見直し結果

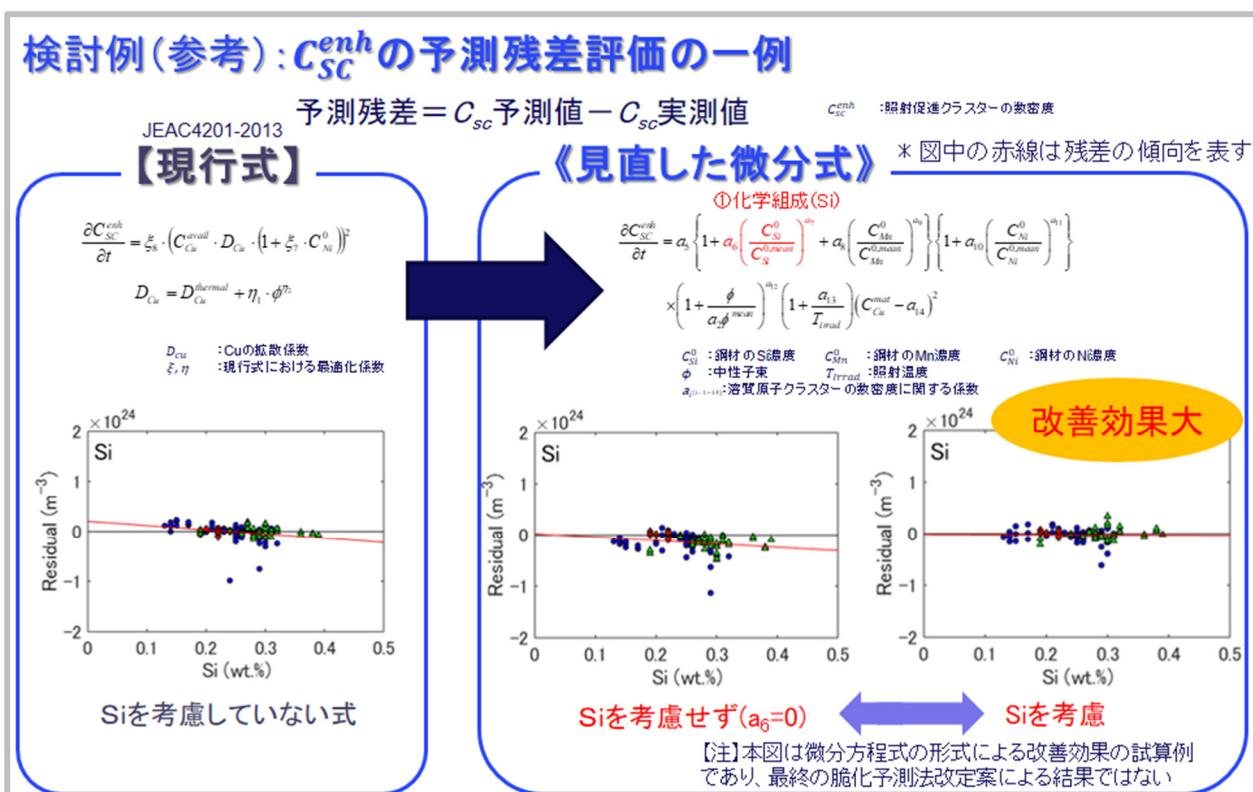


図 4.3.3-11 照射促進クラスター数密度の Si 含有量に対する依存性の分析結果

【JEAC4201-2013現行式】マトリックスCu濃度の式

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{Sc}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$$

↓ ↓ ↓

溶質原子クラスター成長によるCuの減少
溶質原子クラスター形成によるCuの減少

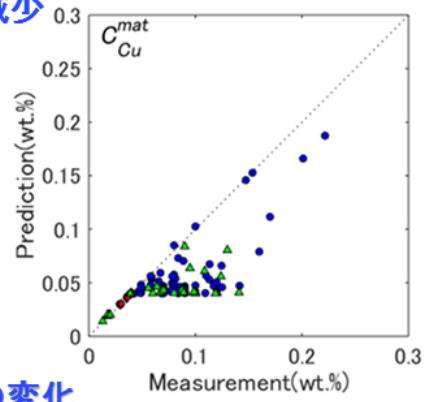
課題: C_{Cu}^{mat} は、0.04 wt.%以上で、
APTデータを再現できていない

《今回の見直し》

⇒現在100点以上のAPTデータを取得

APTデータを再現できる式に見直し

- ① 溶質原子クラスター当たりの平均原子数の変化
- ② 照射温度と中性子束の影響



JEAC4201-2013現行式

図 4.3.3-12 マトリックス Cu 濃度の式の見直し方針

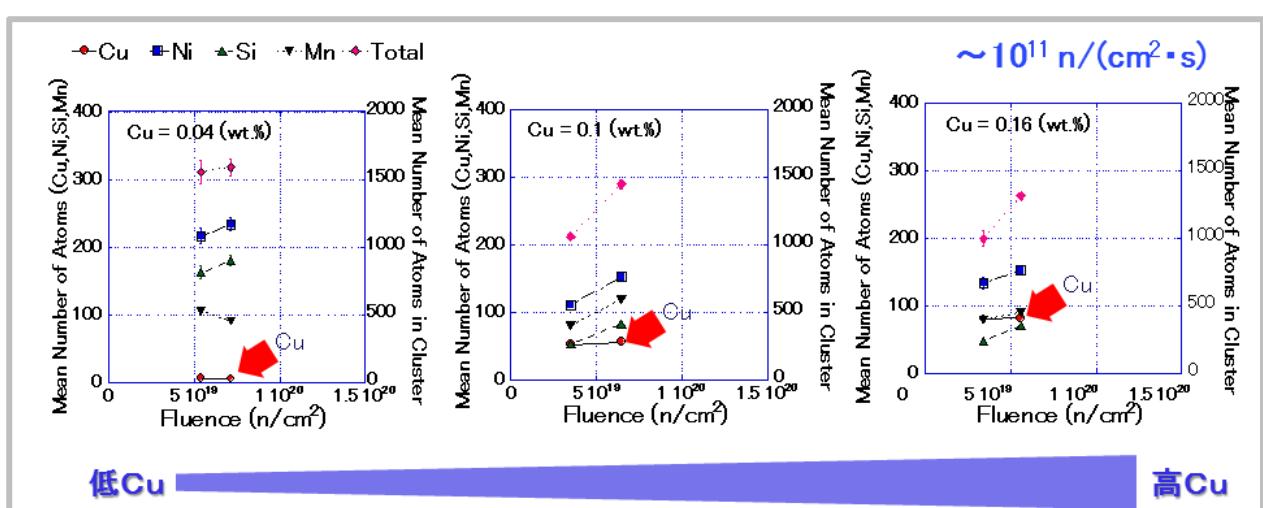


図 4.3.3-13 溶質原子クラスター当たりの平均原子数の照射量に伴う変化

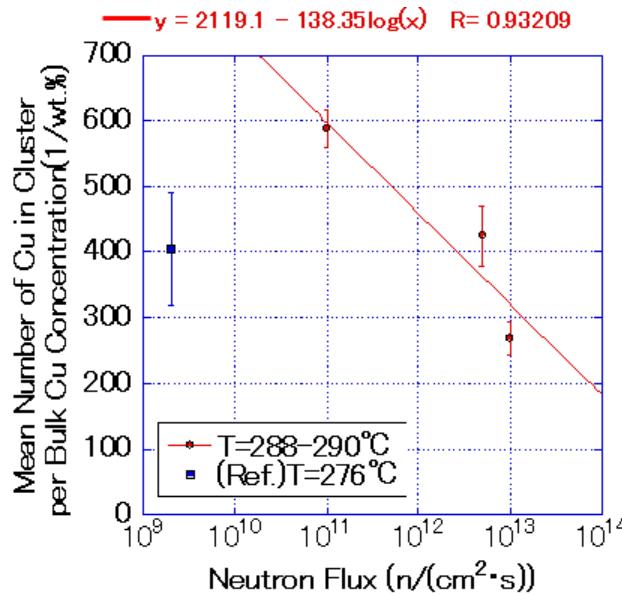


図 4.3.3-14 溶質原子クラスター当たりの平均原子数に対する
照射温度及び中性子束の影響

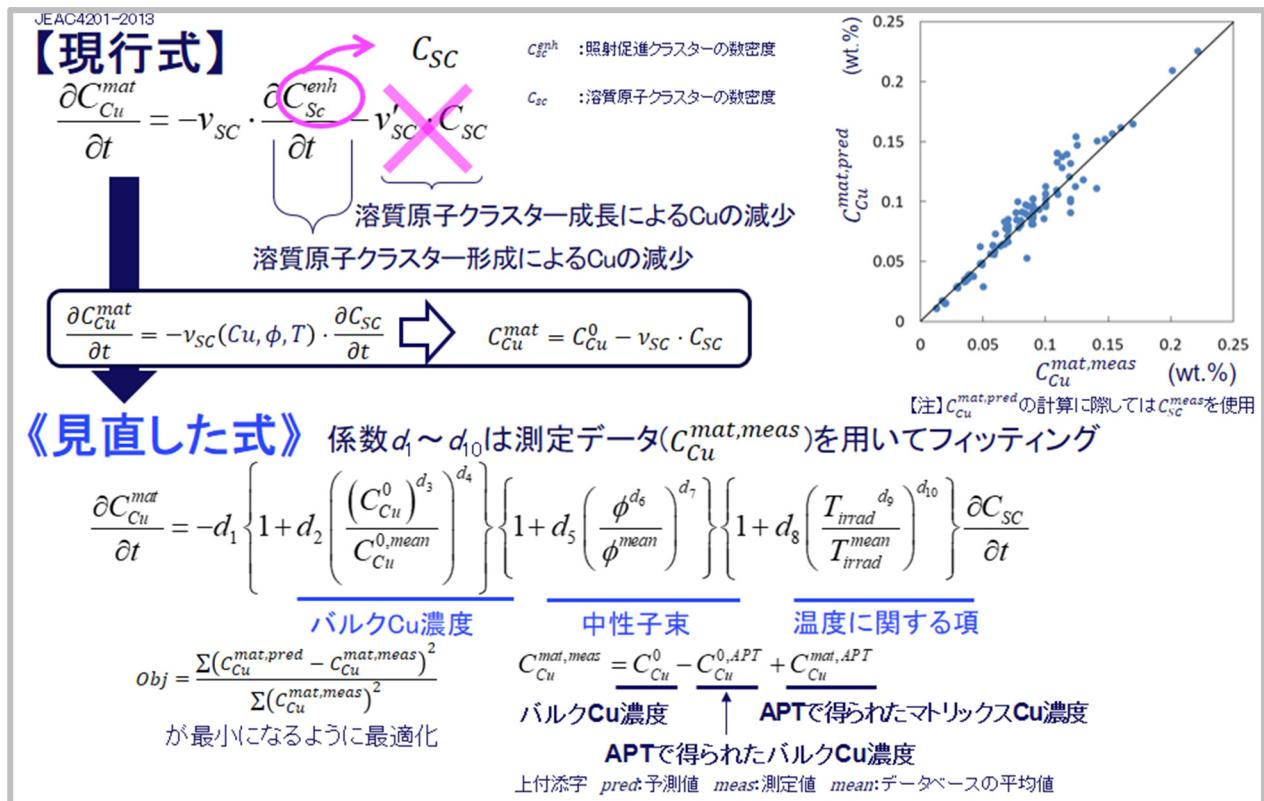


図 4.3.3-15 マトリックス Cu 濃度の式の見直し結果

■ 目的関数が最小になるように係数を最適化

$$Obj_{micro} = \frac{\sum (V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum (V_f^{meas})^2} \rightarrow \min$$

V_f : 溶質原子クラスター体積率(–)
上付添字
pred: 予測値
meas: 測定値

最適化対象: 溶質原子クラスター体積率

● 最適化した係数(相互作用がある項)

- a_1 : 溶質原子クラスター(促進SCと誘起SC)の数密度に関する係数
- b_1 : マトリックス損傷(誘起SCとの相互作用)の数密度に関する係数

● 固定した係数(直接求められる項)

- d_k : マトリックスCu濃度に関する係数
- ζ_1 : 溶質原子クラスター平均体積に関する係数

図 4.3.3-16 見直したミクロ組織変化予測式の溶質原子クラスターに関する各指標の実測値に対する係数最適化(妥当性の確認)

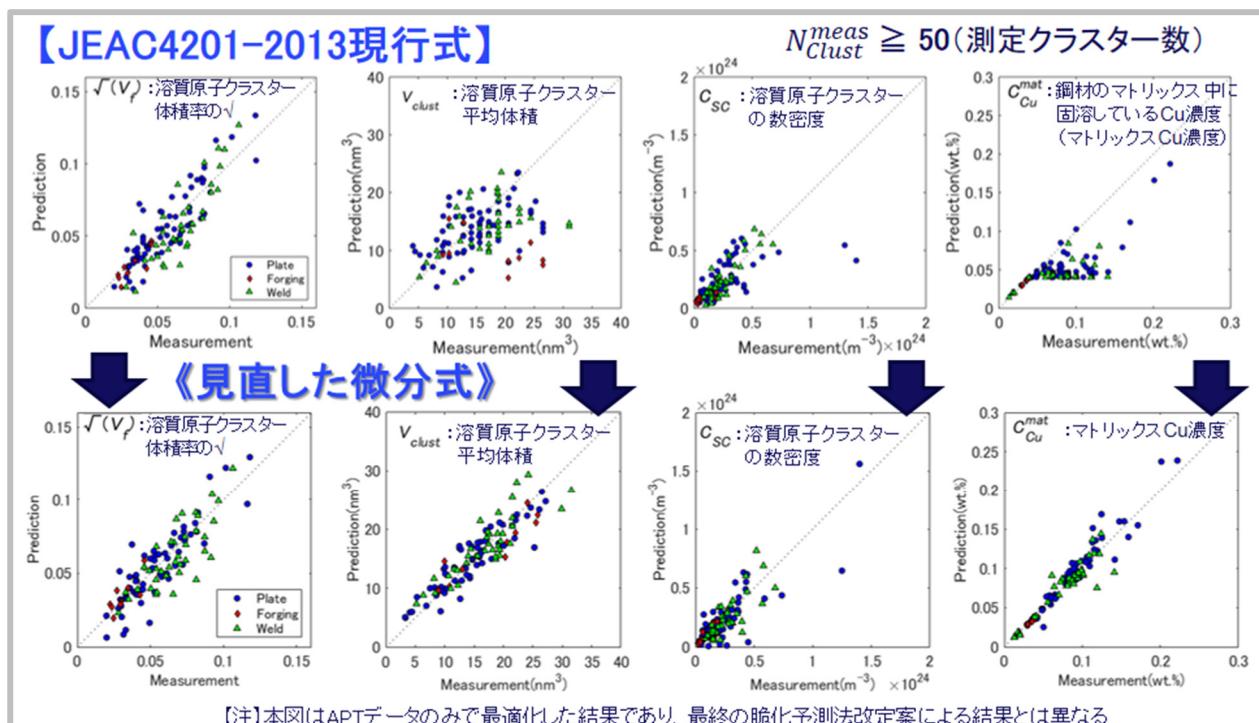


図 4.3.3-17 見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式)による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果(妥当性の確認)

見直した式(微分方程式)を①②で近似し、解析的に解くことを可能に

JEAC4201-2013 現行式		見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1)	溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{13} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_4}\right)^2 + \xi_5 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$	$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{(1 + \zeta_4)}{(1 + \frac{\zeta_4}{288})} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$
(2)	照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \xi_1) \cdot D_{Cu} + \xi_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$ ① マトリックス中のCu濃度は バルクCu濃度に比例として近似 $C_{Cu}^{mat} \propto C_{Cu}^0$
	照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_3 \cdot (C_{Cu}^{mat} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \times \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$ ② マトリックスCuの消費は、照射 促進クラスターで主に生じる (C_{SC}^{enh})として近似
	MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_I^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$ $C_{SC} \approx C_{SC}^{enh}$
(3)	マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

図 4.3.3-18 見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式)の近似解導出

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
溶質原子クラスター平均体積 $V_{Clust} = A + Bt$	$V_{Clust} = A + Bt$
係数式 $A = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{1 + \frac{\zeta_4}{288}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}}$	$A = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{1 + \frac{\zeta_4}{288}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}}, \quad B = (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \frac{1}{10^9}$
マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \times \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t}$	$C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh}$ 係数式 $\delta_1 = d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \times \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\}$
物理量定義 $\Phi [n/cm^2 \cdot s]$: 中性子束 $\phi [n/cm^2]$: 照射量 $t [s]$: 照射時間	$T_{irrad} [^\circ C]$: 照射温度 $C_{Cu}^0 [\text{wt.\%}]$: 鋼材中のCu含有量 $C_{Ni}^0 [\text{wt.\%}]$: 鋼材中のNi含有量 mean : データベースの平均値

図 4.3.3-19(1/3) ミクロ組織変化予測式改定案(1/3)^[65]

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
<p>照射誘起クラスター数密度</p> $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \times \left(1 + a_4 C_{Cu}^{mat} \right) C_{MD}$	<p>改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)</p> $C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$ <p>係数式</p> $\alpha_1 = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^0 \right)$ $\gamma_1 = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right)$
<p>MD(マトリックス損傷)数密度</p> $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \times \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$ <p>係数式</p> <p>照射誘起クラスター数密度の係数式α_1及びγ_1と同一</p>

図 4.3.3-19(2/3) ミクロ組織変化予測式改定案(2/3)^[65]

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
<p>照射促進クラスター数密度</p> $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \times \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) \left(C_{Cu}^{mat} - a_{14} \right)^2$	<p>改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)</p> $C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1} \right)$ <p>係数式</p> $\beta_4 = \begin{cases} \frac{C_{Cu}^0 - \beta_2}{\delta_1}, C_{Cu}^0 - \beta_2 > 0 & \beta_3 = \beta_1 (\delta_1)^2 \\ 0, & C_{Cu}^0 - \beta_2 \leq 0 & \beta_2 = a_{14} \end{cases}$ $\beta_1 = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \times \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right)$
<p>溶質原子クラスター体積率</p> $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

図 4.3.3-19(3/3) ミクロ組織変化予測式改定案(3/3)^[65]

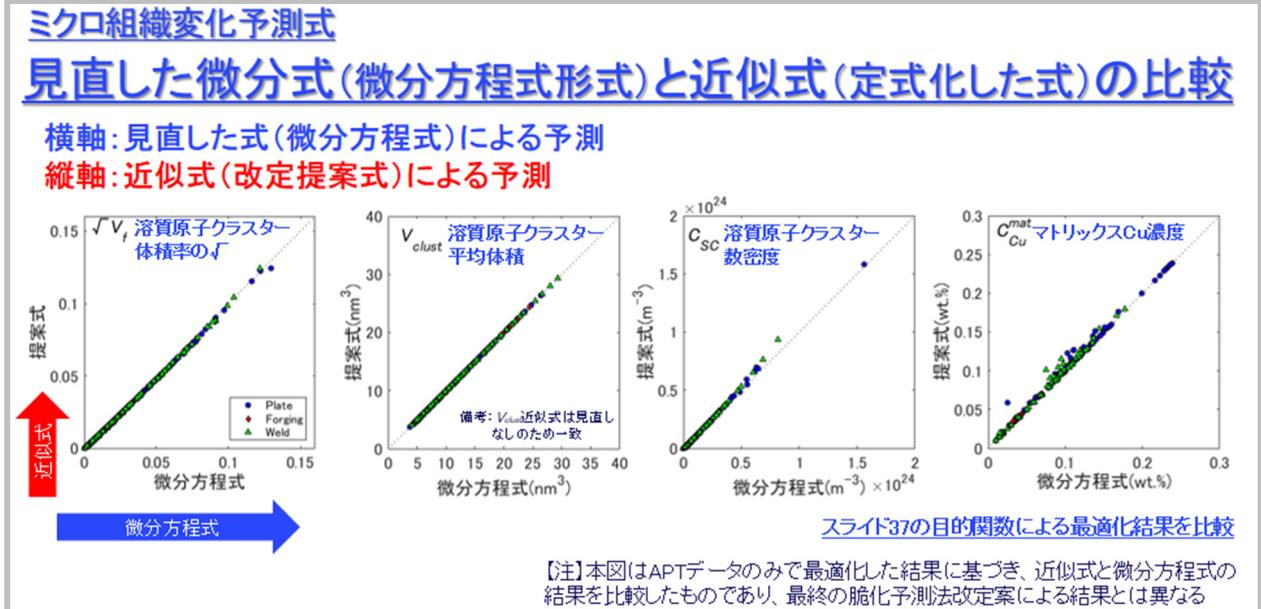


図 4.3.3-20 見直したミクロ組織変化予測式(微分方程式形式)と近似式による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果の比較

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、ミクロ組織変化に関する物理量を以下のような照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

溶質原子クラスター平均体積

$$V_{clust} = A + Bt$$

照射誘起クラスター数密度

$$C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

照射促進クラスター数密度

$$C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1} \right)$$

マトリックス中のCu濃度(マトリックスCu濃度)

$$C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh}$$

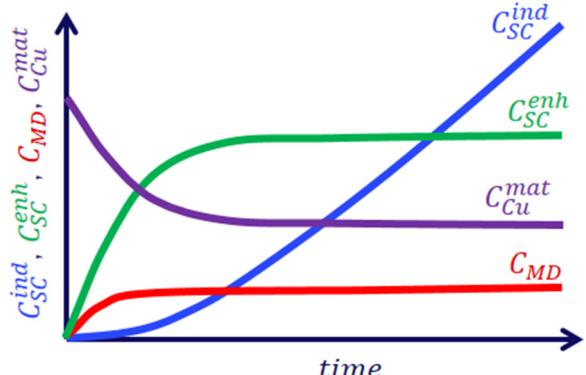
マトリックス損傷(MD)数密度

$$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

溶質原子クラスター体積率

$$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$

※照射量の適用範囲:<1.3x10²⁰ (n/cm²)



備考:本図は照射量の適用範囲で各物理量の時間依存性を模式的に示したものです

図 4.3.3-21 ミクロ組織変化予測式改定案による溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の数密度並びにマトリックス Cu 濃度の時間発展の傾向

4. 3. 4 遷移温度移行量予測式改定案

4. 3. 2項に示した脆化予測法改定案の開発方針を踏まえて検討された遷移温度移行量予測式改定案を本項に示す。

遷移温度移行量予測式の見直しに向けた考え方を図 4.3.4-1 に示す。見直しに際しては、脆化の主要因が中性子照射により形成されたミクロ組織による転位運動の阻害であることと同様に、初期降伏応力に関係するミクロ組織も転位運動の障害物となることから、照射硬化が初期のミクロ組織の影響を受ける可能性があるため、初期降伏応力を取り入れたモデル(以下、非線形モデルと呼称)も検討した。しかし、現状の知見ではその影響を明確に取り入れることが難しいことが判明し、照射により形成される溶質原子クラスター及びマトリックス損傷のみを考慮する現行のモデル(以下、線形モデルと呼称)を踏襲することとした(図 4.3.4-2 参照)。非線形モデルに関する具体的な検討内容及び関連する IET 小委員会での議論内容については、4. 4. 2項に示す。また、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷によるそれぞれの遷移温度移行量については、両者が短範囲相互作用するとの前提を否定する知見は必ずしもないことから、現行予測法の考え方を踏襲して 2 乗和平方根で定式化することとした。

これらの検討から、図 4.3.4-1 に示した遷移温度移行量予測式を、脆化予測法改定案の遷移温度移行量予測式として提案することは妥当と判断される。遷移温度移行量予測式の見直し検討結果を以下にまとめる。

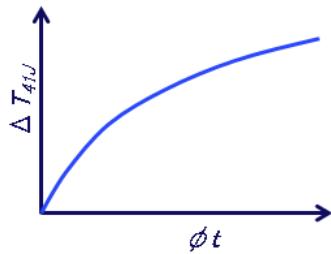
- ・ 遷移温度移行量の定式化に際しては、現行予測法の基本モデル式の考え方を踏襲して、照射により形成される溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類が転位の運動の障害物となり脆化に寄与するモデルを採用し、両者が短範囲相互作用するとして 2 乗和平方根で定式化した。
- ・ 初期降伏応力の寄与については、現状の知見ではその影響を明確に取り入れることが難しいとの判断から考慮しないこととした。
- ・ 以上を踏まえ、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる寄与及びマトリックス損傷による寄与の 2 乗和平方根で表す式を遷移温度移行量予測式改定案として提案する。

遷移温度移行量予測式(線形モデル)

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

$\Delta \sigma_y$: 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)による降伏応力上昇分
 α : 比例係数($\alpha = 0.6$)

$$\Delta \sigma_y = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$



ミクロ組織変化予測式(近似式)

$$\text{マトリックス損傷数密度: } C_{MD} = \frac{v_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

$$\text{溶質原子クラスター体積率: } V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$

$$\text{溶質原子クラスター平均体積: } V_{Clust} = A + Bt$$

$$\text{照射誘起クラスター数密度: } C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{v_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

$$\text{照射促進クラスター数密度: } C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1}\right)$$

図 4.3.4-1 遷移温度移行量予測式の考え方

線形モデルにおける二乗和平方根の採用

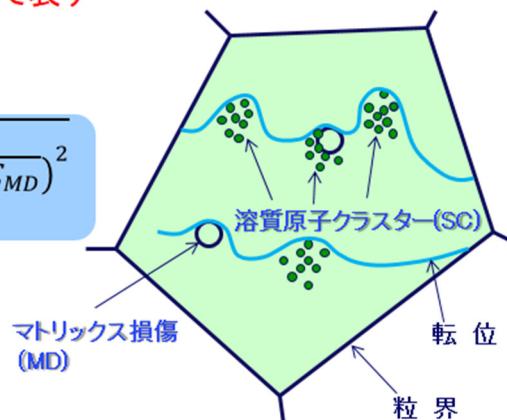
溶質原子クラスターとマトリックス損傷の各因子による照射硬化への全寄与分を各因子の寄与分の二乗和平方根として表す

$$\begin{aligned} \Delta T_{41J} &= \alpha \Delta \sigma_y \quad \Delta \sigma_y = \{(\sigma_y^0 + \sigma_{ID}) - \sigma_y^0\} \\ &= \sigma_{ID} \\ &= \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2} \end{aligned}$$

σ_y^0 : 初期降伏応力

σ_{ID} : 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)の寄与による降伏応力上昇量

$$\sigma_{ID} = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$



転位の運動の障害物は、照射により形成される溶質原子クラスター(SC)とマトリックス損傷(MD)のみが障害物となるとしたモデル

図 4.3.4-2 遷移温度移行量予測式において考慮される転位運動の障害物

4. 3. 5 脆化予測法改定案の基本モデル式における係数最適化及び予測性能の評価

4. 3. 3項に示したミクロ組織変化予測式及び4. 3. 4項に示した遷移温度移行量予測式について、それらの係数最適化結果及び予測性能を評価した結果を本項に示す。

(1) 基本モデル式の係数最適化

脆化予測法改定案の基本モデル式の係数最適化に際しては、ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式に含まれる全てのフィッティング係数をまとめて最適化することとし、以下に示す各指標の目的関数の和(Obj)の値が最小となるように係数を決定した。係数最適化の考え方としては、遷移温度移行量(ΔT_{41J})の予測残差を低減することを最も重視した上で、個別の鋼材の照射に伴う ΔT_{41J} 実測値の推移の傾向を再現できること(ΔT_{41J} に関する項への残差平均値の導入)及び溶質原子クラスターに関する各指標(溶質原子クラスター体積率: V_f , 溶質原子クラスター平均体積: V_{clust} , 溶質原子クラスター数密度: C_{SC} 及びマトリックス Cu 濃度: C_{Cu}^{mat})に対する予測性能も確保することとした。ここで、 ΔT_{41J} 実測値については、APT による分析から溶質原子クラスター体積率 V_f の平方根と線形の相関が認められているが、APT データについては国内全照射データについて得られているわけではないため、目的関数の設定に際しては ΔT_{41J} に関する項($Obj_{\Delta T_{41J}}$)及び溶質原子クラスターの各指標に関する項(Obj_{V_f} , $Obj_{V_{clust}}$, $Obj_{C_{SC}}$, $Obj_{C_{Cu}^{mat}}$)の両方を考慮し、各項の適切な比率については、複数のケースの組み合わせを試行して設定することとした。また係数最適化に際しては、現行予測法の係数最適化の際とは異なり照射時間に応じた ΔT_{41J} への重み付けは行なわなかった。以上、係数最適化の考え方について図 4.3.5-1 にまとめる。

係数最適化に用いた目的関数を図 4.3.5-2 に示す。ここで $Obj_{\Delta T_{41J}}$ には、照射量と脆化量の相関の予測性を向上させるために脆化量の予測残差の平均値(O_a)が考慮されている。図 4.3.5-3 に O_a のイメージを示した。

目的関数の各項に乘じる係数 \bar{A} から \bar{E} については、複数の組み合わせのケースを試行した。係数 \bar{A} から \bar{E} の組み合わせについては、まず ΔT_{41J} の予測残差を最小にするため、係数 \bar{A} を最も大きな値(0.7~1 の範囲)とし、残り(0~0.3)を \bar{B} から \bar{E} に割り振った。また、 V_f については、 $V_f = V_{clust} \times C_{SC}$ であるため、 Obj_{V_f} に乘じる係数 \bar{B} 及び $Obj_{C_{SC}}$ に乘じる係数 \bar{D} についてはいずれかを 0 とし、係数 \bar{B} については 0~0.3 の範囲、係数 \bar{D} については 0~0.15 の範囲とした。また、 $Obj_{V_{clust}}$ に乘じる係数 \bar{E} は係数 \bar{D} と同様に 0~0.15 の範囲とした。さらに、 C_{Cu}^{mat} についても、その予測性能が ΔT_{41J} の推移の傾向を再現する上で重要となることから、目的関数の指標に含め、 $Obj_{C_{Cu}^{mat}}$ に乘じる係数 \bar{C} も係数 \bar{D} , \bar{E} と同様に 0~0.15 の範囲とした。これら \bar{A} から \bar{E} の範囲で、全 28 ケースの係数 \bar{A} から \bar{E} の組み合わせを設定して試行した。試行ケースの一覧を図 4.3.5-4 に示す。

これら複数の係数最適化結果から最適と思われる係数の組み合わせを選定する指標を図 4.3.5-5 に示す。これは ASTM E900-15 を参考にして設定されたものである。最適ケースの選定に際しては、まず現行予測法の予測精度を念頭に残差の平均値 $|\mu| < 1^\circ\text{C}$ かつ残差の標準偏差 $\sigma < 10.5^\circ\text{C}$ をスクリーニング基準とし、この基準を満たすケースを抽出する。さらに ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標に対する予測残差を算出し、予測残差の入力パラメ

ータ依存性が最も少ないケースを最適ケースとして選定した。予測残差の入力パラメータ依存性の評価は t 検定で用いられる t 値を各入力パラメータについて算出し、その二乗和の小さいものを依存性が少ないと評価した。

図 4.3.5-4 に示した試行条件一覧から、スクリーニング基準を満たす候補ケースを抽出した結果を図 4.3.5-6 に示す。結果として Trial #2~8, 10~12, 15, 16 の計 12 ケースが候補ケースとして抽出された。これら候補ケースについて、 t 値の 2 乗の総和を評価した結果を図 4.3.5-7 に示す。結果として Trial#15 ($\bar{A}=0.8$, $\bar{B}=0.05$, $\bar{C}=0.1$, $\bar{D}=0$, $\bar{E}=0.05$) の目的関数が最適ケースと判定された。

- 遷移温度移行量だけでなく、ミクロ組織変化に関する物理量も予測する
 - 遷移温度移行量およびミクロ組織変化に関する物理量の目的関数が設定されることになる
- 最も重要な遷移温度移行量の予測精度が高くなるように目的関数の遷移温度移行量 (\bar{A}) の寄与を大きくした
 - 目的関数の寄与 $\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$ (スライド 53 参照) の配分は、どの予測量を重要視するかという方針による。今回の改定では遷移温度移行量 (\bar{A}) を重視した。
($\bar{A}: \Delta T_{41}$ がデータベース全データに、 $\bar{B} \sim \bar{E}$ は APT 測定したデータに対し考慮)
- 特定の最適化対象データに対する重み付けはしないこととした
 - 全データに対して均一に最適化するため
- 目的関数に残差平均値 (O_a) を取り入れる
 - 最適化に資した照射データ実測値と予測曲線の残差を最小化する
- 遷移温度移行量予測式の係数の最適化とともに、ミクロ組織変化予測式の係数も最適化した

図 4.3.5-1 ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の係数最適化の方針

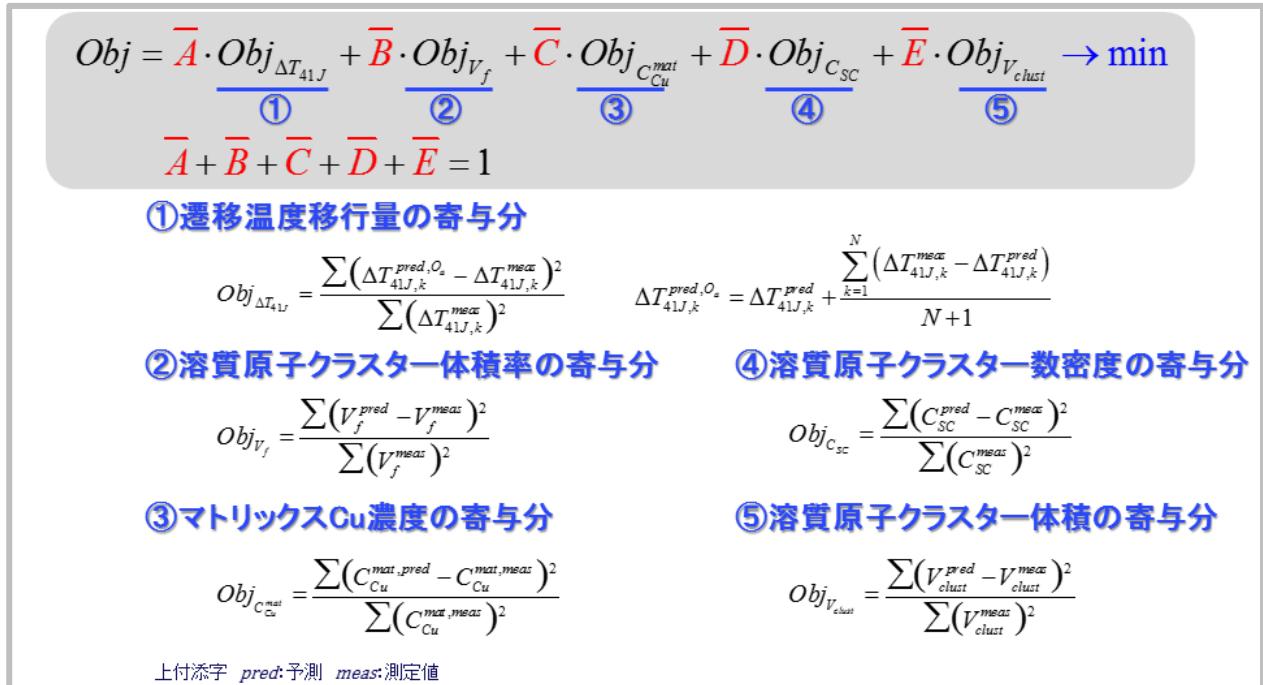
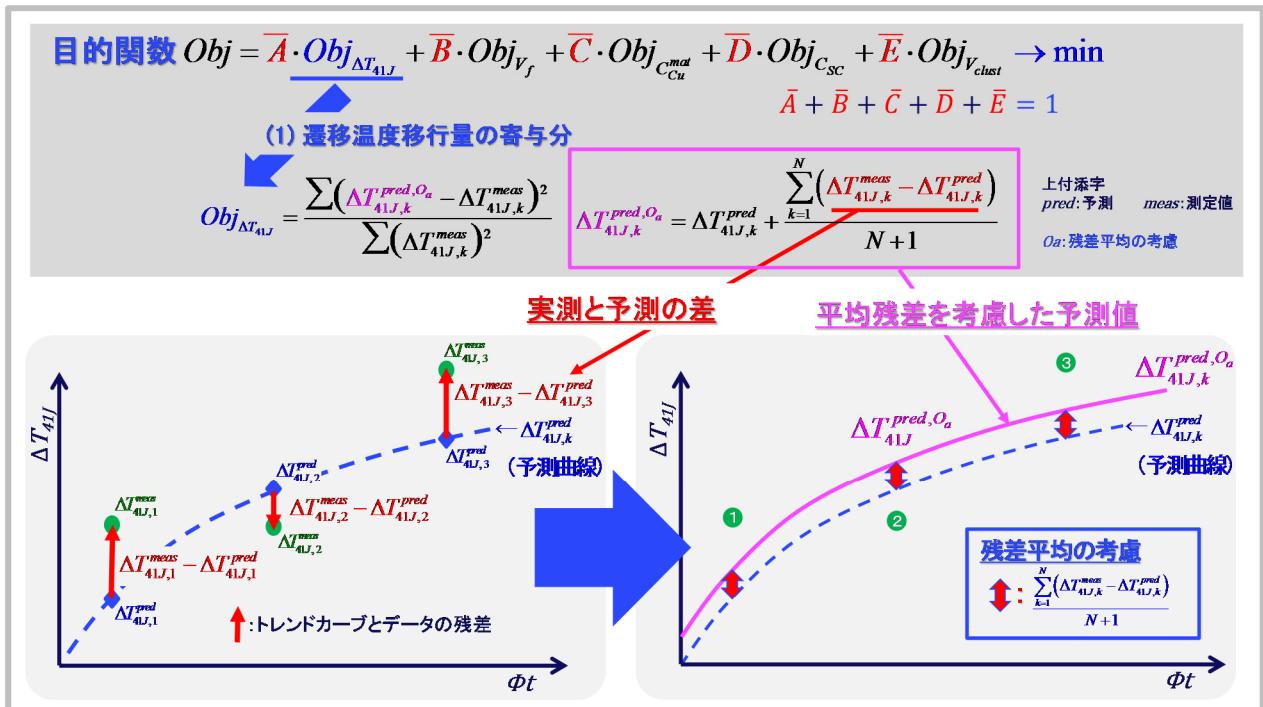


図 4.3.5-2 係数最適化に用いる目的関数

図 4.3.5-3 目的関数 $Obj_{\Delta T_{41J}}$ における予測残差の平均値(O_a)の考慮

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{sc}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\boxed{\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1}$$

遷移温度移行量、ミクロ組織予測式両方の係数を最適化

Trial #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{A}	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
\bar{B}	0	0.1	0.033	0	0.05	0.025	0.025	0	0	0
\bar{C}	0	0	0.033	0.033	0.025	0.05	0.025	0.05	0.025	0.025
\bar{D}	0	0	0	0.033	0	0	0	0.025	0.05	0.025
\bar{E}	0	0	0.033	0.033	0.025	0.025	0.05	0.025	0.025	0.05

V_f は C_{sc} と V_{clust} の掛け算, $V_f = C_{sc} \cdot V_{clust}$

$\bar{B} > 0$ & $\bar{D} = 0$ もしくは $\bar{B} = 0$ & $\bar{D} > 0$ としている

V_f : 溶質原子クラスター体積率
 V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 C_{sc} : 溶質原子クラスターの数密度

図 4.3.5-4(1/3) 係数最適化の試行ケース一覧(1/3)

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{sc}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\boxed{\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1}$$

遷移温度移行量、ミクロ組織予測式両方の係数を最適化

Trial #	11	12	13	14	15	16	17	18	19
\bar{A}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
\bar{B}	0.2	0.066	0	0.1	0.05	0.05	0	0	0
\bar{C}	0	0.066	0.066	0.05	0.1	0.05	0.1	0.05	0.05
\bar{D}	0	0	0.066	0	0	0	0.05	0.1	0.05
\bar{E}	0	0.066	0.066	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.1

V_f は C_{sc} と V_{clust} の掛け算, $V_f = C_{sc} \cdot V_{clust}$

$\bar{B} > 0$ & $\bar{D} = 0$ もしくは $\bar{B} = 0$ & $\bar{D} > 0$ としている

V_f : 溶質原子クラスター体積率
 V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 C_{sc} : 溶質原子クラスターの数密度

図 4.3.5-4(2/3) 係数最適化の試行ケース一覧(2/3)

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\boxed{\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1}$$

遷移温度移行量、ミクロ組織予測式両方の係数を最適化

Trial #	20	21	22	23	24	25	26	27	28
\bar{A}	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
\bar{B}	0.3	0.1	0	0.15	0.075	0.075	0	0	0
\bar{C}	0	0.1	0.1	0.075	0.15	0.075	0.15	0.075	0.075
\bar{D}	0	0	0.1	0	0	0	0.075	0.15	0.075
\bar{E}	0	0.1	0.1	0.075	0.075	0.15	0.075	0.075	0.15

V_f は C_{SC} と V_{clust} の掛け算, $V_f = C_{SC} \cdot V_{clust}$
 $\bar{B} > 0$ & $\bar{D} = 0$ もしくは $\bar{B} = 0$ & $\bar{D} > 0$ としている

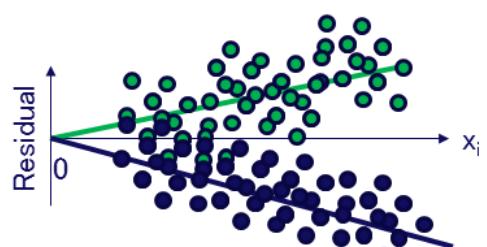
V_f : 溶質原子クラスター体積率
 V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度

図 4.3.5-4(3/3) 係数最適化の試行ケース一覧(3/3)

残差評価: 係数最適化の良し悪しの基準

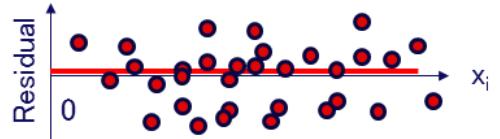
■ 残差の標準偏差 σ と平均値 μ を、それぞれの試行で計算

- 良い予測: $\sigma \rightarrow \text{小}, \mu \approx 0$
- 良い予測の候補: $|\mu| < 1^\circ\text{C}, \sigma < 10.5^\circ\text{C}$



■ t検定を用いて、予測残差のパラメータ依存性を評価

- $t < 1.96$: 残差にパラメータ依存性がない
- $\sum t^2$ が最小となるものを候補の中から探す

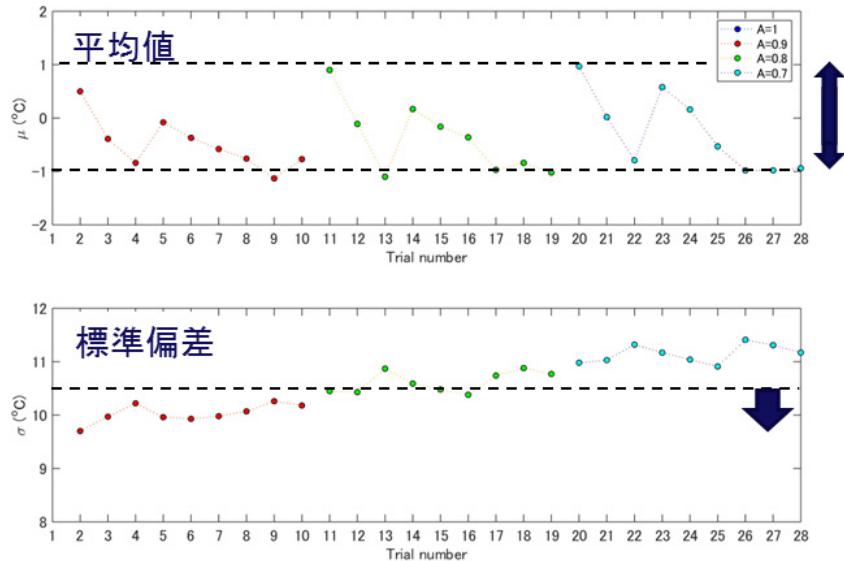


■ ASTM E900-15と同様の手法を採用

図 4.3.5-5 最適ケースの選定指標

改定提案式: 良い予測の候補: $|\mu| < 1^\circ\text{C}$, $\sigma < 10.5^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} Obj = & \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{max}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{chart}} \rightarrow \min \\ \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = & 1 \end{aligned}$$



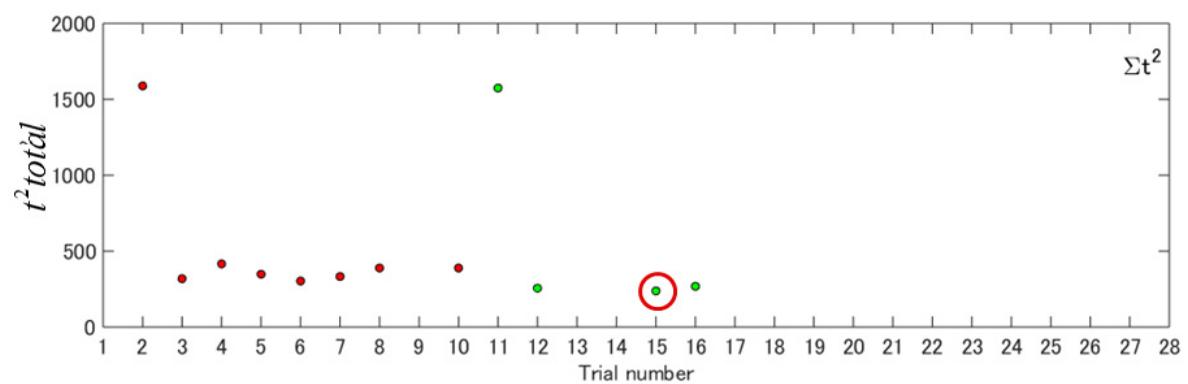
→ 候補: Trial 2,3,4,5,6,7,8,10,11,12,15,16

図 4.3.5-6 候補ケースの抽出

改定提案式: Σt^2

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{max}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{chart}} \rightarrow \min$$

$$t^2 total = \sum_i t_{m(x_i)}^2 \quad \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$$



候補: Trial 2,3,4,5,6,7,8,10,11,12,15,16 → 選別したもの 15

Trial 15: A=0.8, B=0.05, C=0.1, D=0, E=0.05

図 4.3.5-7 最適ケースの判定結果

(2) 予測性能の評価

ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の各項の係数を、(1)で選定した Trial #15 の目的関数により最適化して設定した。以降では、このようにして導出された基本モデル式の予測性能を評価した結果を示す。

最適化により決定した係数を用いて、 ΔT_{41J} を予測した結果を現行予測法による ΔT_{41J} の予測結果と比較して図 4.3.5-8 に示す。 ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差は 10.5°C, 予測残差の平均は-0.2°Cであり、現行予測法の予測残差の標準偏差 9.6°C, 予測残差の平均-0.4°Cと同程度であった。さらに溶質原子クラスター体積率の平方根、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度の予測結果を現行予測法による結果と比較して図 4.3.5-9 に示す。見直しにより得られた基本モデル式は、 ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差が現行予測法の 9.6°C と同程度で、溶質原子クラスターに関する各指標に対する予測性能が現行予測法よりも向上したことがわかる。

また、IET 小委員会の活動終了後に、4. 3. 3 項に示したミクロ組織変化予測式(近似式)を導出する前の微分方程式形式のミクロ組織変化予測式(図 4.3.3-3 の右側の列の式)及び4. 3. 4 項に示した遷移温度移行量予測式の各項の係数について、データベースを見直した上で(1)で選定した Trial #15 の目的関数により係数最適化が行われ、ミクロ組織変化予測式(近似式)と微分方程式形式のミクロ組織変化予測式による ΔT_{41J} の予測性能の比較が行われた。その結果、いずれのミクロ組織変化予測式を用いても ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標の予測性能にほとんど差はないことがわかった。それらの評価内容をまとめて付録 4 に示す。

以上、(1)及び(2)の検討より、図 4.3.3-19 に示すミクロ組織変化予測式及び図 4.3.4-1 に示す遷移温度移行量予測式の各項の係数を Trial #15 の目的関数により最適化して決定した式を脆化予測法改定案として提案することは妥当と判断される。

検討結果を以下にまとめる。

- ・ 係数最適化に際しては、ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の各項の係数をまとめて最適化することとし、 ΔT_{41J} に加えて溶質原子クラスターに関する指標に対する予測性能を確保できるよう目的関数を設定した。
- ・ 係数最適化に際しては、現行予測法の係数最適化の際とは異なり照射時間に応じた個々の ΔT_{41J} への重み付けは行わなかったが、 ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差が現行予測法と同程度で、溶質原子クラスターに関する各指標に対する予測性能が向上した最適化結果が得られた。
- ・ 上記の係数最適化により得られた係数を適用したミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式を脆化予測法改定案として提案する。

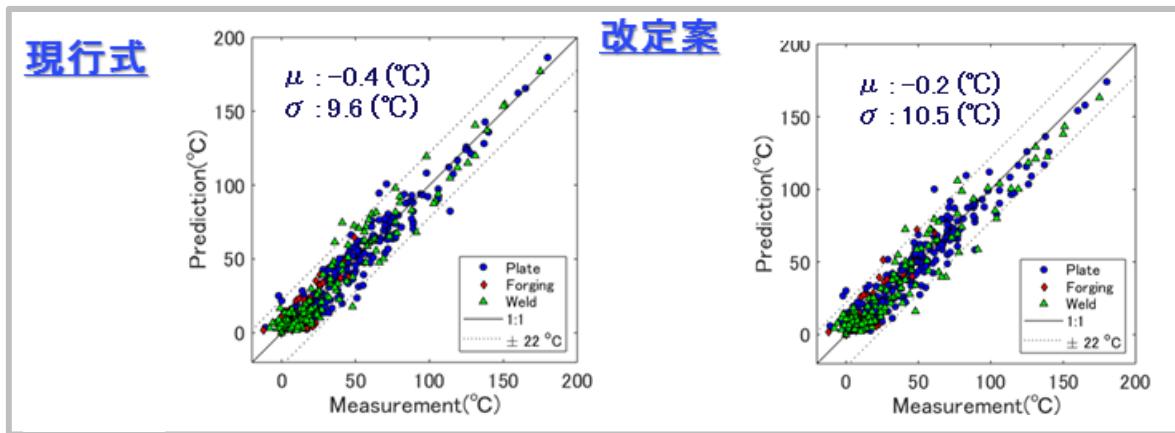
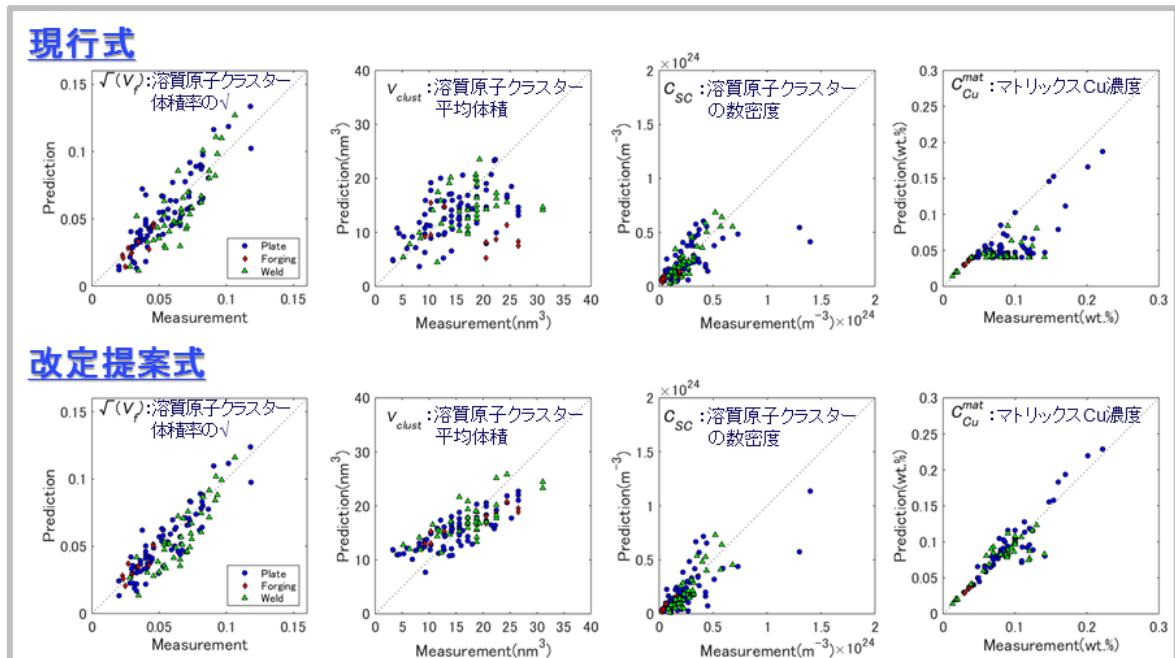
図 4.3.5-8 現行予測法及び脆化予測法改定案による ΔT_{41J} の予測結果

図 4.3.5-9 現行予測法及び脆化予測法改定案による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果

4. 3. 6 脆化予測法改定案における ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方

JEAC4201 では、脆化予測法により求めた遷移温度移行量(ΔT_{41J})の計算値(ΔRT_{NDT} 計算値^{注 36)})を原子炉圧力容器の評価に用いる際に、監視試験で得られた個別の鋼材の ΔT_{41J} 実測値の推移の傾向を踏まえて ΔRT_{NDT} 計算値を補正することやマージンを加算することが規定されている。脆化予測法改定案で算出した ΔRT_{NDT} 計算値を原子炉圧力容器の評価に適用する際の補正やマージン設定の具体的方法については、今後、電気協会で検討されることになるが、本項では産業界委員により検討中の 2020 年 1 月時点での ΔRT_{NDT} 計算値の補正及びマージン設定の考え方を示す。

(1) ΔRT_{NDT} 計算値の補正

現行予測法により得られた遷移温度移行量(ΔRT_{NDT} 計算値)から原子炉圧力容器の評価に用いられる RT_{NDT} 調整値^{注 37)}を算出する方法^[1]を図 4.3.6-1 に示す。 RT_{NDT} 調整値は RT_{NDT} 初期値^{注 38)}に ΔRT_{NDT} 予測値を加算することで算出される。 ΔRT_{NDT} 予測値は、 ΔRT_{NDT} 計算値を当該鋼材の監視試験により得られた ΔT_{41J} 実測値の推移を踏まえて求めた M_C により補正した上で、マージン M_R を加算して算出される^{注 39)}。 ΔRT_{NDT} 計算値に対する具体的な補正方法^[1]を図 4.3.6-2 に示す。同図において、 M_C は当該の鋼材を対象とした過去の全ての監視試験結果との予測残差(ΔT_{41J} 実測値− ΔRT_{NDT} 計算値)の平均値^{注 40)}として算出され、その正負によらずこれを ΔRT_{NDT} 計算値に加算する。

現行予測法の技術評価時には、 M_C による補正について、負に補正することの妥当性や個別鋼材ごとに偏りが生じる要因などが論点となり、結果として予測残差の標準偏差は不規則に分布しているとはいえないと考えることが妥当と判断され、鋼材ごとに M_C により補正することは正規分布として見なす際の信頼性を高くすると評価された^[2]。また、技術評価結果を受けた付加要件として、特に原子炉圧力容器の照射量が高くなる PWR プラントを対象として M_C の精度向上等の観点から、運転開始後 40 年目以降に追加の監視試験を実施することが要求されると共に、鋼材ごとに M_C に偏りが生じる要因の分析が進むことが期待された(図 4.3.6-3,4 参照)^[2]。

^{注 36)} 本報告書では、遷移温度移行量の計算値を ΔT_{41J} 計算値の表記に統一しているが、本項では JEAC4201 と整合を図り、 ΔRT_{NDT} 計算値と表記する。

^{注 37)} JEAC4201 に従い、 RT_{NDT} 初期値に照射に伴う遷移温度移行量を考慮することで照射効果を調整した関連温度(RT_{NDT})を意味する。

^{注 38)} JSME 設計・建設規格の PVB-2333.1 の規定に従い、衝撃試験及び落重試験によって得られる照射前の関連温度(RT_{NDT})を意味する。

^{注 39)} 式で表わすと、 ΔRT_{NDT} 予測値=[ΔRT_{NDT} 計算値+ M_C]+ M_R

^{注 40)} JEAC4201 に規定された M_C は、全ての監視試験(試験回数:n)における予測残差の総和を n で除して算出され、初期値のばらつきは考慮されない。一方、4. 3. 5 項(1)に示した脆化予測法改定案の係数最適化に用いる予測残差の平均値(O_a)は、初期値のばらつきも考慮して n+1 で除することで算出される。本報告書に示す予測残差の平均値は全て後者の方(O_a)で算出された。

JEAC4201 に規定された M_C ;

図 4.3.6-2

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^n \{(\Delta RT_{NDT}\text{実測値})_i - (\Delta RT_{NDT}\text{計算値})_i\}}{n}$$

係数最適化の際に用いる予測残差の平均値(O_a) ;

図 4.3.5-3

$$O_a = \frac{\sum_{i=1}^n \{(\Delta T_{41J}\text{実測値})_i - (\Delta T_{41J}\text{計算値})_i\}}{n + 1}$$

脆化予測法改定案において、遷移温度移行量の計算結果を予測残差の平均値(O_a ^{注 40)}、算出方法は図 4.3.5-3 参照)により補正すると、図 4.3.6-5 に示すように予測残差の標準偏差が、10.5°Cから 7.2°Cに減少するが、 O_a に何らかの系統的な依存性が認められるかを国内全照射データにより傾向分析した。脆化予測法改定案による O_a の度数分布を現行予測法による結果と併せて図 4.3.6-6 に示す。現行予測法及び脆化予測法改定案共に度数分布の平均はほぼ 0 となっており、分布形状も正負のいずれ側にも偏っていない。さらに、圧延材、鍛造材、溶接金属別に分けた O_a の度数分布を図 4.3.6-7 に示すが、圧延材、鍛造材、溶接金属による分布形状の違いは特段認められない。また、 O_a の各種初期パラメータに対する依存性を分析した結果を図 4.3.6-8 に示すが、USE 初期値^{注 41)}、初期降伏応力、 T_{41J} 初期値^{注 42)}、 RT_{NDT} 初期値^{注 38)}のいずれに対しても明瞭な依存性は見られない。

以上より、脆化予測法改定案を適用して求めた個別の鋼材の O_a は、全体的な傾向としては特定のパラメータと相関のあるものではなく、その要因を系統的に明らかにすることは困難と考えられる。

一方、関連する研究^[66]として、脆化予測法を適用して特定の鋼材を対象として予測を行うことは、遷移温度移行量の予測残差の観点からは、統計的には母集団(全国内照射データ)から標本(当該鋼材の過去の全ての監視試験結果)を抽出する行為と位置付けることができ、その場合、遷移温度移行量の評価に際して Mc を考慮することは、母集団平均と標本平均の差(標本誤差)を考慮することに相当することが示されている。さらに研究の一環として当該鋼材の予測残差(標本)の標準偏差をベイズ更新により推定する試みもなされている(図 4.3.6-9 参照)^[66]。

以上の分析結果や関連研究動向を踏まえて、産業界委員により検討中の脆化予測法改定案における補正の考え方を図 4.3.6-10 に示す。脆化予測法が改定されても、個別プラントの脆化管理において監視試験と脆化予測を併用する枠組みは引き続き維持されることから、新たに取り出したより長時間照射された監視試験片の ΔT_{41J} 実測値の推移を当該の原子炉圧力容器の健全性評価に適切に反映する必要がある。このため、脆化予測法改定案においても、個々の鋼材の脆化予測に際しては、予測残差の平均値により ΔRT_{NDT} 計算値を補正するとの現行予測法の考え方を踏襲することが適切と判断される。また、特に照射量の高い PWR プラントの原子炉圧力容器は基本的に監視試験結果が得られている照射量の範囲内で運転されることから、 ΔT_{41J} 実測値の推移を原子炉圧力容器の評価に反映することで健全性評価の信頼性は向上すると考えられる。

注 41) 照射前のシャルピー衝撃試験結果において、延性破面率が 100%を示す温度における全ての試験片の吸収エネルギーの平均値。

注 42) 照射前のシャルピー衝撃試験結果の平均の遷移曲線において、吸収エネルギーが 41J を示す温度(T_{41J})。

$$\begin{aligned} RT_{NDT\text{調整値}} &= \text{初期}RT_{NDT} + \Delta RT_{NDT\text{予測値}} \\ \Delta RT_{NDT\text{予測値}} &= [\Delta RT_{NDT\text{計算値}} + M_C] + M_R \end{aligned}$$

□ $\Delta RT_{NDT\text{計算値}}$

- 数表を内挿または公開のソースコードを用いて直接計算
- 照射量、照射速度、照射温度、Cu・Ni含有量を入力

□ M_C 補正

- 監視試験が2回以上ある場合に、監視試験実測値と $\Delta RT_{NDT\text{計算値}}$ の差の平均値を M_C とする

□ M_R ：マージン

- M_C 補正をする場合は18°C、補正をしない場合は22°C
- ΔRT_{NDT} の実測値が $\Delta RT_{NDT\text{予測値}}$ を上回る場合は、実測値を包含するように設定
さらに、監視試験回数nが3以上で、前回までの監視試験による予測値を上回る脆化が確認された場合には、外挿予測に際して追加のマージン M_{RMAX} を加算

図 4.3.6-1 現行予測法における原子炉圧力容器の評価に用いる RT_{NDT} 調整値の計算方法^[1]

□ 2回以上の監視試験結果が得られている場合は、 $\Delta RT_{NDT\text{実測値}}$ の平均的な推移に沿うように $\Delta RT_{NDT\text{計算値}}$ に下式で求める差分平均値(M_C と呼称)を加算する(監視試験結果に対する補正)

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^n \{(\Delta RT_{NDT\text{実測値}})_i - (\Delta RT_{NDT\text{計算値}})_i\}}{n}$$

□ $\Delta RT_{NDT\text{実測値}}$ の推移によっては、 M_C は負になる場合もある

□ $[\Delta RT_{NDT\text{計算値}} + M_C]$ が負となる場合は、0とする

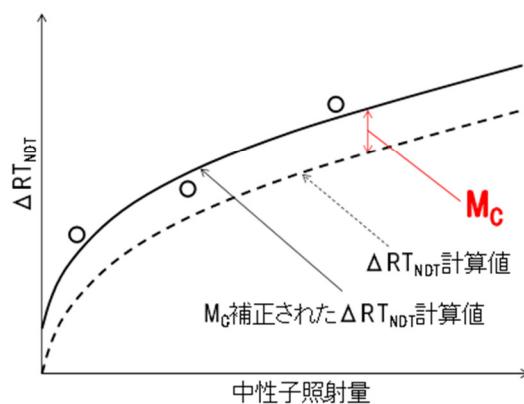


図 4.3.6-2 現行予測法における $\Delta RT_{NDT\text{計算値}}$ の補正方法^[1]

- ΔRT_{NDT} 計算値を負に補正することの妥当性(電気協会回答)
 - 個々の鋼材で考えると、監視試験を重ねて複数の照射後データを取得することにより、当該鋼材の実際の脆化傾向が把握できる
 - 負に補正された鋼材についても監視試験の脆化傾向をよく再現しており、将来の予測性にも配慮($n-1$ 回 M_C 値に基づきマージンを設定)して脆化予測を行なっている
 - BWRプラントは監視試験結果が少ない等の理由により、運用上負の補正是行っていない
- 個別プラント(鋼材)ごとに偏りが生じる要因(電気協会回答)
 - 3つの要因が考えられる
 - 未照射及び照射後のシャルピー衝撃試験による T_{41J} 実測値のばらつき
 - 予測に使用する評価条件の誤差・ばらつき
 - 予測法で考慮していない因子による脆化の影響
 - M_C 値は監視試験データの ΔRT_{NDT} 実測値と計算値の残差を材料毎に平均した値として計算され、各鋼材に対して求めた M_C 値は全て(M_C 補正なし) M_R の 22°C より小さい

図 4.3.6-3 現行予測法の技術評価時の論点(M_C 関連)^[2]

- ΔRT_{NDT} 計算値の補正に対する評価結果
 - 予測残差の標準偏差がプラントごとや中性子照射量によって特異な傾向がなく不規則に分布しているか確認した結果、不規則に分布しているとはいえないことが妥当と判断した
 - 鋼材毎に残差の偏りを補正することは、正規分布としてみなす際の信頼性を高くする
 - M_C 補正是鋼材毎に算出される値であり、データ数が多いほど当該鋼材の M_C 値の精度が向上する
- 追加の監視試験の実施
 - 個別プラントの監視試験データをより多く取得することで、個別プラントの予測値の精度を高めることが目的
(原子炉容器内面の照射量が $2.4 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を上回るPWRプラントが対象)
 - 原子炉容器内面の照射量が既に得られた監視試験結果の照射量を上回る前に次の監視試験を行う
 - (40年超運転の場合)少なくとも10年に一度監視試験を行う
- 今後の進展が期待される研究
 - 個別プラントごとに予測値に対して偏りが生じる原因の分析

図 4.3.6-4 現行予測法の技術評価結果(M_C 関連)^[2]

- 提案式における差分平均値を用いた補正による予測残差の変化
 - 提案式においても、補正により予測残差の標準偏差が減少する
 - 補正值に何らかの系統的な依存性が見れないか傾向分析を行なった

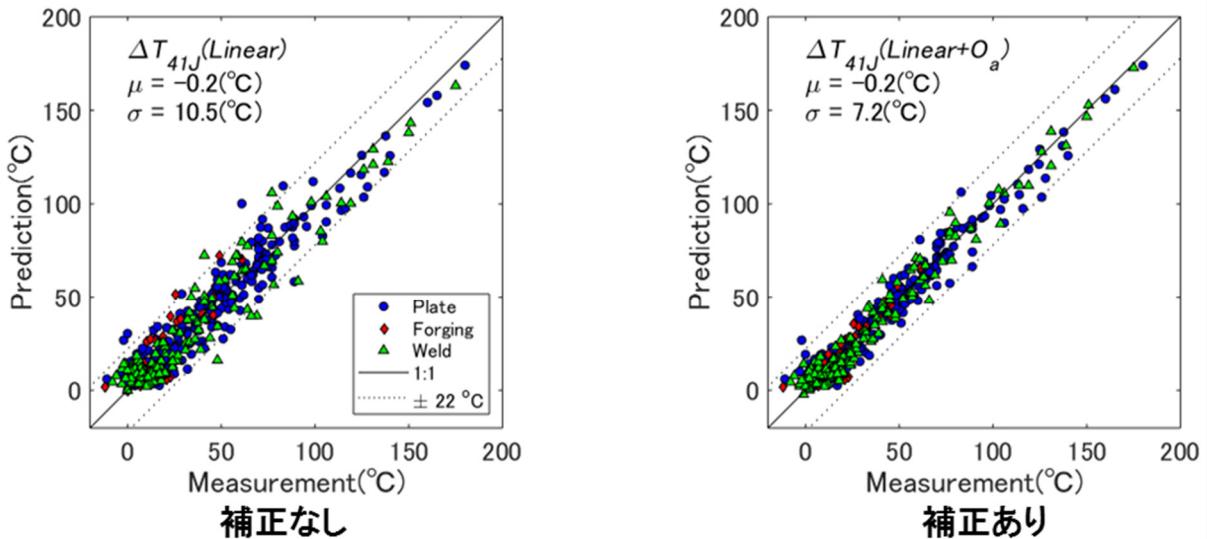


図 4.3.6-5 予測残差の平均値(O_a)を考慮した場合の予測残差の変化

- 現行予測法と提案式の差分平均値の分布(全鋼種)
 - いずれも平均はほぼ0であり、土側のどちらへも分布の偏りは見られない
 - 標準偏差も大差なく、ばらつきも同程度と判断される

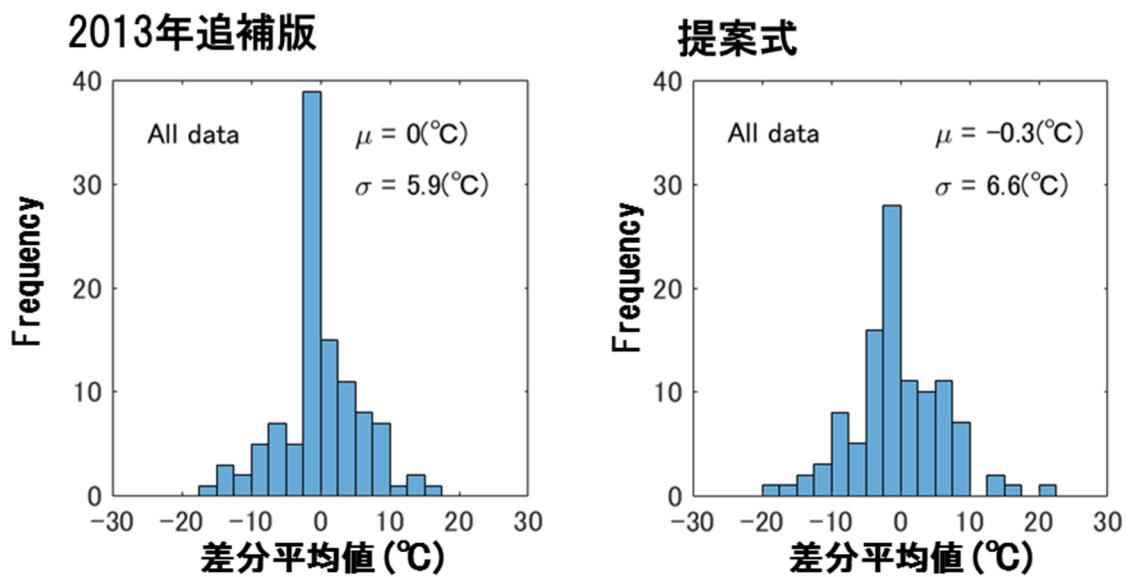


図 4.3.6-6 現行予測法及び脆化予測法改定案により求めた O_a の度数分布
(国内全照射データ)^{注43)}

^{注43)} 図中のグラフ横軸の「差分平均値」は、予測残差の平均値 O_a (算出方法は図 4.3.5-3 参照)を意味する。

□ 現行予測法と提案式の差分平均値の分布(鋼種別)

□ 明瞭な鋼種別の違いは認められない

□ 鍛鋼品は若干マイナス側に偏る傾向だが、データ数も少なく傾向は明瞭ではない

2013年追補版

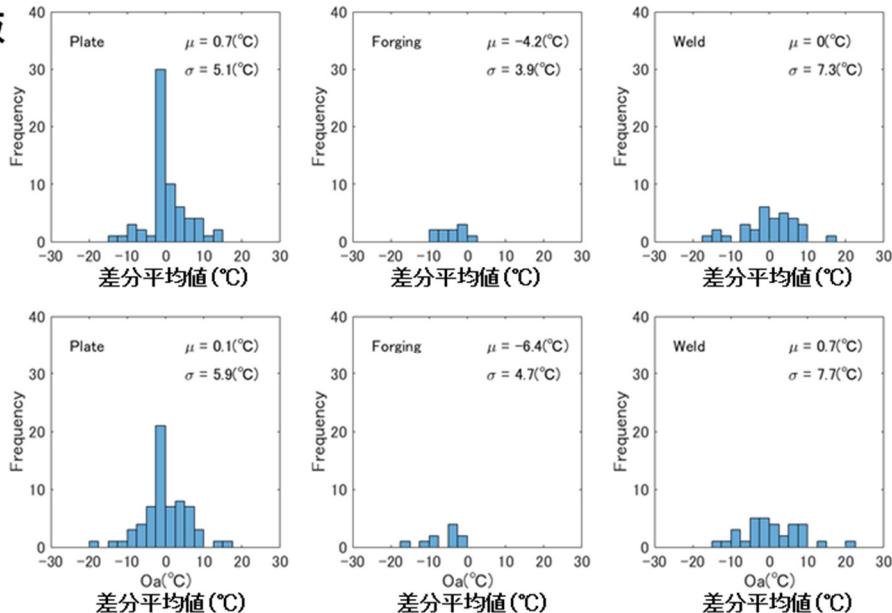


図 4.3.6-7 現行予測法及び脆化予測法改定案により求めた O_a の度数分布
(鋼材の種類別)^{注43)}

・2013年追補版

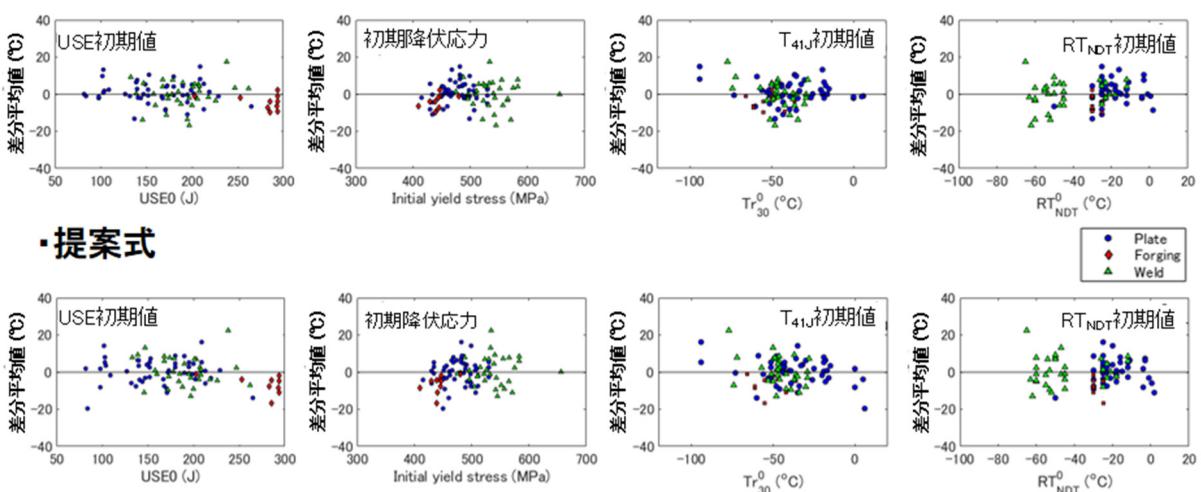


図 4.3.6-8 現行予測法及び脆化予測法改定案により求めた O_a の各種初期パラメータに対する依存性

□ M_c 値に関する統計的な観点からの説明

- 個別鋼材に対して予測を行うことは、予測残差に着目すると母集団から標本を抽出する行為とみなすことができる。このとき、評価に際しては標本誤差を考慮する必要がある。
- 標本誤差を考慮する代わりに、個別鋼材の予測に際して M_c 補正を行うことは統計的な観点からは有効と考えられる。この際、マージンとして母集団の標準偏差を用いるのは適切ではない。
- 個別鋼材の予測残差の分布を正規分布と仮定して、ベイズ推定を用いて、新たな監視試験データが得られる都度、ベイズ更新により分布を更新する手法を開発した。
- この手法は、 M_c 補正と同程度の精度があり、得られた分布を個別プラントのリスク評価に拡張できる可能性がある。

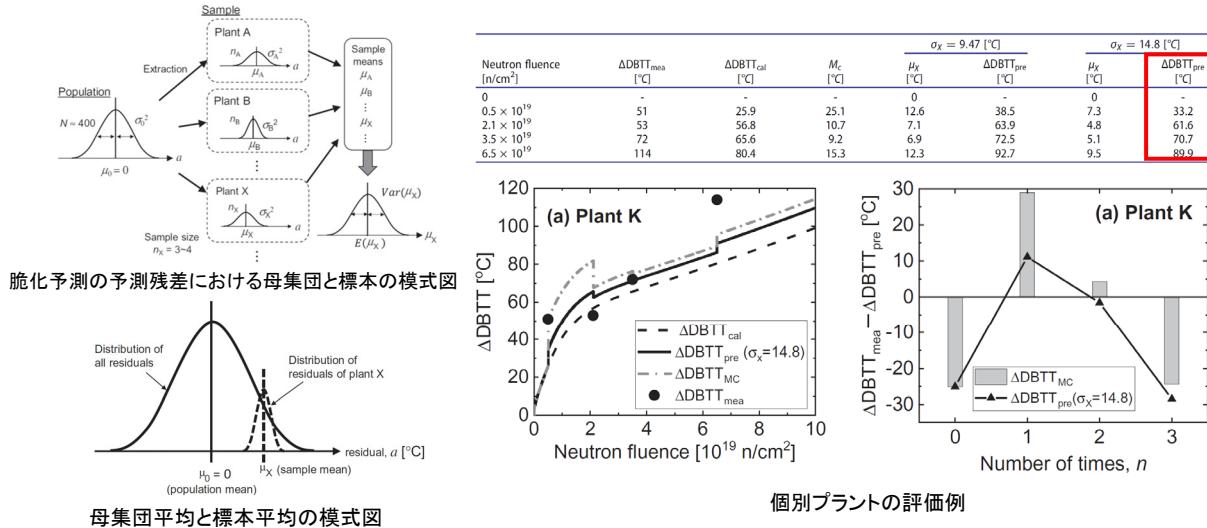


図 4.3.6-9 現行予測法における M_c に関する統計的な観点からの検討例^[66]注 44), 注 45)

□ 個別プラントの脆化管理において、監視試験と脆化予測を併用する枠組みは今後も維持される → 基本的に内挿領域で運転される

□ 個別プラントの健全性評価の観点:

- 脆化予測法は国内鋼材の平均的な脆化傾向を与えるものであり、提案式でも考慮しきれない個別鋼材固有の差異は依然として残る
- 健全性評価では、新たに得られる監視試験結果を含めて速やか(脆化予測法の見直し要否検討結果を待たず)に評価に反映する必要がある

□ 脆化予測法の高度化の観点:

- 監視試験結果がある程度蓄積された段階で、それらの傾向分析結果を踏まえて脆化予測法の見直し要否の検討が行われる

⇒ 各々の鋼材の脆化予測に際しては、現行予測法と同様に予測残差の差分平均値により補正する

図 4.3.6-10 脆化予測法改定案における ΔRT_{NDT} 計算値の補正の考え方(2020 年 1 月時点)

注 44) 図中右下のグラフ縦軸の「 $\Delta DBTT$ 」は、遷移温度移行量(ΔT_{41J})を意味し、注 23)の DBTT とは算出方法が異なる。

注 45) 図中の下段の複数の図及び表は、Taylor & Francis 社の許可を得て文献[66]の図及び表を転載した。Copyright © 2019 Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, http://www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

(2) ΔRT_{NDT} 計算値に考慮するマージン

図 4.3.6-1 に示した通り、現行予測法により ΔRT_{NDT} 予測値を算出する際には、 ΔRT_{NDT} 計算値 + M_c にマージン M_R が加算される。 M_R は、図 4.3.6-11 に示すように予測残差の標準偏差の 2 倍に平均予測誤差を考慮して設定されている^[1]。 ΔT_{41J} 実測値が M_R を加算した ΔRT_{NDT} 予測値^{注 39)}を上回る場合はこれを包含するように M_R を見直す^[1]。また、監視試験結果が得られている照射量範囲を超える領域については、最も新しい監視試験データを考慮しないで求めた M_c により ΔRT_{NDT} 計算値を補正して得られた ΔRT_{NDT} 予測値からの差分を踏まえて、 M_R に追加のマージン M_{RMAX} を加算する(図 4.3.6-12 参照)^[1]。

現行予測法の技術評価の際には、 M_R について、予測残差に加えてシャルピー衝撃試験のばらつきを考慮することの影響が議論され、結果として M_R への寄与は小さく直ちに考慮する必要はないと判断された^[2]。ただし、次回改定版の技術評価ではシャルピー衝撃試験やドシメータによる中性子照射量等の測定誤差が予測結果に与える影響を考慮しているかを確認するとされた(図 4.3.6-13 参照)^[2]。

産業界委員により検討中の脆化予測法改定案におけるマージン設定の考え方を図 4.3.6-14 に示す。マージンの設定に際しては、現行予測法の技術評価の際の議論を踏まえて、予測残差の標準偏差や平均予測誤差に加えて、測定誤差等が予測結果に与える影響を分析した上で設定することを検討する。分析対象とする不確かさの因子としては、シャルピー衝撃試験による T_{41J} 実測値の不確かさ、脆化予測法自体の不確かさ、化学成分や中性子照射量(中性子束)のばらつきによる脆化予測の不確かさが挙げられる。マージン設定に際しては、これらの不確かさの因子が脆化予測結果に及ぼす影響を評価した上で、誤差伝播の法則に基づき各因子の標準偏差の 2 乗和平方根を考慮することが考えられる。

(1)及び(2)に示した産業界委員により検討中の 2020 年 1 月時点での脆化予測法改定案における ΔRT_{NDT} 計算値の補正及びマージン設定の考え方を以下にまとめる。

- ・個別プラントの照射脆化管理において監視試験と脆化予測を併用する枠組みは引き続き維持され、 ΔT_{41J} 実測値の推移を当該の原子炉圧力容器の健全性評価に適切に反映する必要があることから、脆化予測法改定案においても、予測残差の平均値による ΔRT_{NDT} 計算値の補正を継続する。
- ・マージン設定に際しては、現行予測法で考慮している予測残差の標準偏差や平均予測誤差に加えて、測定誤差等の各因子の不確かさによる遷移温度移行量のばらつきの標準偏差を、誤差伝播の法則に基づき 2 乗和平方根で考慮して設定することを検討する。

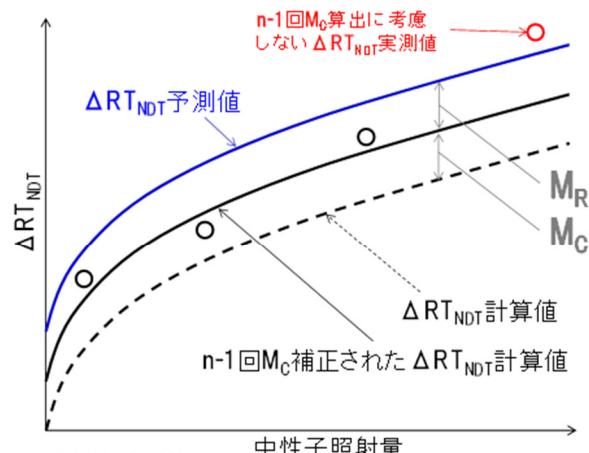
□ 予測残差の標準偏差の2倍に平均予測誤差を考慮して設定

- M_C 補正なし: ΔRT_{NDT} 計算値の予測残差の標準偏差9.5°C
及び平均予測誤差^{※1}-1.1°Cを考慮

□ $2 \times 10 + 2 = \underline{22^{\circ}\text{C}}$

- M_C 補正あり: $n-1$ 回 M_C 補正による予測残差^{※2}の標準偏差8.2°Cを考慮
(平均予測誤差は1.4°Cであり、保守的に考慮しない)

□ $2 \times 9 = \underline{18^{\circ}\text{C}}$



※1 平均予測誤差: $[\Delta RT_{NDT} \text{計算値}(n \text{回} M_C \text{補正}) - \Delta RT_{NDT} \text{実測値}]$ の平均値

※2 将来の予測性を考慮し、 n 回目のデータの予測値を求める際に、 $n-1$ 回目までのデータから計算した M_C 補正值を用いて予測残差を算出

図 4.3.6-11 現行予測法における M_R の考え方^[1]

□ 予測を上回る場合: ΔRT_{NDT} 実測値 > ΔRT_{NDT} 計算値 + (n 回) M_C + M_R

□ 予測を上回る場合の対応

- ΔRT_{NDT} 実測値が予測を上回る場合は、これを包含するように M_R を再設定して ΔRT_{NDT} 調整値を求める

□ 監視試験データの外挿評価となる照射量領域に対する追加要求

- 監視試験回数(n)が3以上で、 $n-1$ 回までの監視試験による予測を上回る
 ΔRT_{NDT} 実測値が得られた場合には、外挿予測に際して追加のマージン
 M_{RMAX} を加算する

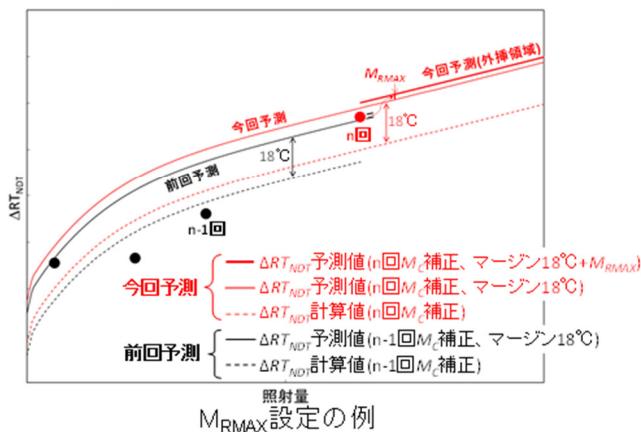


図 4.3.6-12 監視試験結果が ΔRT_{NDT} 予測値を上回る場合の対応^[1]

□ マージンに対する評価結果

- マージン M_R において考慮される予測残差の発生要因(電気協会回答)
 - 予測に用いる評価条件の誤差・ばらつき(シャルピー衝撃試験から関連温度を求める際のばらつきも含む)
 - 予測法で考慮していない因子による脆化の影響
- 仮にシャルピー衝撃試験のばらつきが含まれないとして、別途それを二乗和平方根で考慮しても、マージン M_R に対する寄与は小さく、直ちに考慮する必要はないと判断される。
 - シャルピーの平均遷移曲線に対するマージン: $M_T = (8/\sqrt{9}) \times 2.306 \approx 6.15$
 - マージンへの寄与: $\sqrt{M_R^2 + M_T^2} = \sqrt{18^2 + 6^2} \approx 19.0$

□ 基本モデル式を改定する場合の視点

- 今後の予測式改善に寄与する可能性があると指摘があった事項が考慮されているか
 - シャルピー衝撃試験やドシメーターによる中性子照射量等の測定誤差が予測式に与える影響
 - 引張試験結果の予測式への反映
 - 銅の含有量が0.16%を超え、ニッケルが多い材料の場合は予測値が過大になること

図 4.3.6-13 現行予測法の技術評価結果(M_R 関連)^[2]

□ 技術評価時の議論を踏まえて、測定誤差が予測式に与える影響を考慮してマージンを設定する

□ 前提:

- シャルピー衝撃試験により得られる $\Delta T_{41,J}$ 実測値のばらつきの標準偏差は、未照射試験のばらつきの標準偏差 σ_0 と照射後試験のばらつきの標準偏差 σ_i の二乗和平方根で与えられる
- 予測残差のない理想的な脆化予測式を用いて $\Delta T_{41,J}$ を予測する場合:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_i^2}$$
- ΔRT_{NDT} 計算値に対して補正を行う場合は、
 - $T_{41,J}$ 初期値のばらつきが打ち消されるため、 σ_0 が0となる(下図参照)
 - 補正後の予測残差の標準偏差を用いる(補正前よりも減少)

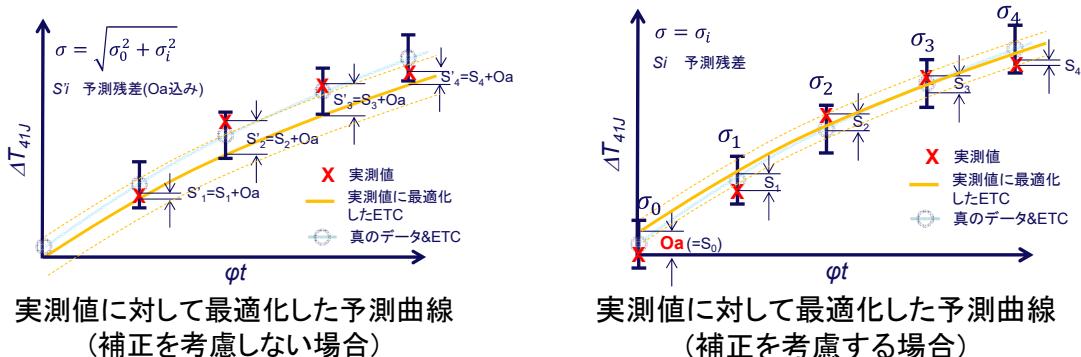


図 4.3.6-14(1/2) 脆化予測法改定案におけるマージン設定の考え方(2020 年 1 月時点) (1/2)

- マージン設定に際して考慮する不確かさの因子
 - シャルピー衝撃試験による T_{41J} 実測値の不確かさ
 - 脆化予測式自体の不確かさ
 - 化学成分(Cu,Ni,Mn,Si)のばらつきによる脆化予測の不確かさ
 - 中性子照射量(中性子束)のばらつきによる脆化予測の不確かさ

- マージン設定に際しての考え方(案)
 - 照射前と照射後それぞれのシャルピー衝撃試験による T_{41J} 実測値の不確かさを考慮する
 - 脆化予測式自体の不確かさは、予測式の予測残差の標準偏差を踏まえて評価する
 - 化学成分及び中性子照射量による脆化予測の不確かさは、入力値をばらつかせた ΔT_{41J} のモンテカルロ計算に基づき評価する
 - マージン設定に際しては、上記の各因子の2乗和平方根を考慮する

図 4.3.6-14(2/2) 脆化予測法改定案におけるマージン設定の考え方(2020 年 1 月時点) (2/2)

4. 4 脆化予測法改定案に対する技術的知見等に基づくレビュー

4. 3節では、IET 小委員会での議論内容を踏まえて、電中研の委員が最終的に提案した脆化予測法改定案並びに ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方を示した。本節では、産業界委員と照射脆化メカニズムに精通した専門家委員との技術的知見等に基づくレビューとして行われた最終提案に至る過程の脆化予測法改定案に関する意見交換の内容を、ミクロ組織変化予測式改定案に関する事項、遷移温度移行量予測式改定案に関する事項、脆化予測法改定案の係数最適化におけるプロセスの適切性に関する事項、脆化予測法改定案における ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方に関する事項に分けて記載する。IET 小委員会では、脆化予測法改定案の照射脆化メカニズムとの的確性の観点についてのみ議論を行ない、遷移温度移行量の予測精度や評価の妥当性に関する議論は行なっていない。

4. 4. 1 ミクロ組織変化予測式改定案に関する議論

ミクロ組織変化予測式改定案に関する議論は、大別して現行予測法及び脆化予測法改定案の技術根拠に関する確認事項、照射脆化メカニズムとの整合に関する議論、脆化予測法改定案の規格化に際しての留意点に分類される。以降では、この分類に基づいてそれぞれの項目に関する議論内容を示す。

(1) 現行予測法及び脆化予測法改定案の技術根拠に関する事項

4. 1. 2項に示した現行予測法及び4. 3. 3項に示した脆化予測法改定案のミクロ組織変化予測式の技術根拠に関して、専門家委員から確認を求める事項が示された。

a. 反応速度論に基づく予測について

専門家委員より、現行予測法の基本モデル式は反応速度論に基づく定式化を採用していることについて、今後も反応速度論に基づいて構築することの是非について質問があり、電中研の委員より以下の回答があった。

ミクロ組織変化予測式改定案では、開発の初期段階から「反応速度論」に基づく関数形を用いずに、一般的な「時間発展の微分方程式」と位置づけて、各時刻で生じている現象(主に溶質原子クラスターの形成及び成長)を数式で表現(モデル化)しており、アприオリに関数形を定める場合と比べて自由度を大きくしている点が現行予測法とは大きく異なる。ミクロ組織変化予測式改定案では、照射に伴うミクロ組織変化として、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の 2 種類を考慮する考え方は変更しておらず、現行予測法の開発当初と比べて溶質原子クラスターに関するデータが拡充されたことを受けて、溶質原子クラスターに関する指標の再現性を向上させたモデルに修正したものである。なお、導出されている特定の関数形の妥当性については検証できている。

以上の電中研の委員の回答に対して、専門家委員より、ミクロ組織変化予測式改定案は

APT により得られた溶質原子クラスターに関連するデータに対してフィッティングであわせているだけであり、APT 以外の方法で得られた他の照射脆化メカニズムとの整合については論じられないとの意見が寄せられた。

b. Cu の寄与に着目してミクロ組織変化予測式を改定することについて

専門家委員より、低照射量領域で影響が飽和する Cu の寄与よりも高照射量領域で寄与が大きくなるマトリックス損傷に寄与する化学成分に着目したほうがよいのではないかとの趣旨で、Cu の寄与に着目してミクロ組織変化予測式を見直すことの是非について質問があり、電中研の委員より以下の回答があった。

国内の原子炉圧力容器の鋼材では Cu の含有量に一定の範囲があり、今後も Cu を主要な脆化要因として考慮することは重要と考えられる。一方、マトリックス損傷については、Ni により転位ループの数密度が影響を受けるとの研究結果は古くから知られていることから Ni をパラメータとして考慮している。

Mn については、マトリックス損傷に寄与することが知られており、Ni-Mn-Si クラスターの形成にも寄与するが、鋼材のマトリックス中に存在する Mn は、製鋼時の析出物形成によりミルシート等の公称値よりも含有量が遙かに低くなり、その範囲も大きく変化しないことから、今回検討対象とした国内全照射材のデータベースの範囲においては、マトリックス損傷の数密度の式に Mn をパラメータとして陽に取り込んでいない。ただし、式のパラメータとして考慮しないことが、すなわちメカニズムの観点から脆化に寄与しないということを意味するものではない。検討対象としているデータベースの範囲でその元素を考慮しても、予測残差に変化がないのであればパラメータとして陽に取り込む必要はないと判断している。

c. 溶質原子クラスター中の Cu 原子の割合と溶質原子クラスター直径の関係や他の元素が含まれる場合の強度因子への影響

専門家委員より、溶質原子クラスター中の Cu 原子の割合と溶質原子クラスター直径の関係や、他の元素が含まれた場合の強度因子への影響について質問があり、電中研の委員より以下の回答があった。

照射量が同じ試料では、溶質原子クラスター直径が異なっても溶質原子クラスター中の Cu 原子の割合は概ね一定となっている。しかし、同じ鋼材でも照射量が異なると、溶質原子クラスター内の Cu, Ni, Mn, Si の各原子の割合は異なり、照射量によって Cu 原子の割合は異なること(図 4.2.1-9 の左側のグラフ)、Cu 原子についてはある照射量以上で溶質原子クラスター中の平均個数が変化しなくなる(図 4.2.1-9 の右側のグラフ)こと、その結果としてある照射量以上では溶質原子クラスター直径が増大しても Cu 以外の原子が集積して相対的に Cu 原子の割合が減少する傾向となることがわかつてきた。また、鋼材が異なる場合は Cu 含有量が高いほど溶質原子クラスター中の Cu 原子の割合は高くなる(図 4.2.1-9 の左側のグラフ)。

以上の電中研の委員の回答に対して、専門家委員より溶質原子クラスターの組成が変化

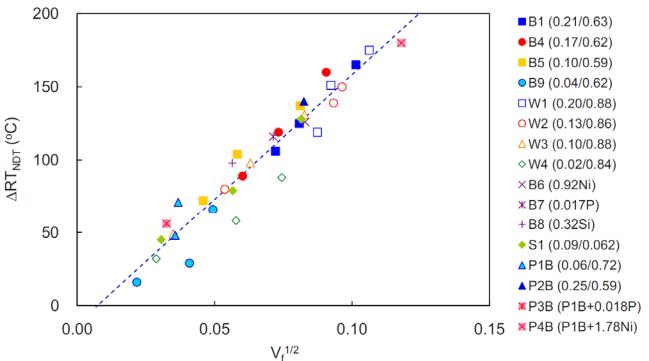
した場合の転位運動障害強度因子あるいは脆化への影響の有無について質問があった。これに対し、JNES による PRE プロジェクト^[21~24]ではいろいろな組成の鋼材を照射しており、その中で Cu を含む溶質原子クラスターや含まない溶質原子クラスターをあわせて分析した結果、いずれの組成の溶質原子クラスターでもその体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と ΔT_{41J} 実測値に線形の相関が認められ^[17]、その影響は小さいと考えられるとの回答があった(図 4.4.1-1 参照)。また、別の専門家委員より、原子炉圧力容器の鋼材で、鋼材の組成によらず、 $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} 実測値に線形の相関が見られる要因として、溶質原子クラスター中の Cu 原子は 0~10at.% の範囲で連続的に変化しており、溶質原子クラスター中の元素の組成にあまり差がないことが一因と考えられるとの補足があった。一方、別の専門家委員からは、 $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} 実測値に線形の相関が見られるとしているが、実機の監視試験における低照射量領域及び高照射量領域を除く中間の照射量領域ではその相関がみられないとの指摘があった。これに対し、電中研の委員からは、最近の試験炉で照射されたデータでは低照射量から高照射量に至る広い照射量の範囲で線形の相関が認められるとの回答があった。これを受けて、同委員より顕著な照射速度依存性がなければ $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} 実測値の間に線形の相関があると考えるのは妥当であると言えるが、今後得られる監視試験(低照射速度)の結果により検証していく必要があるとの意見が寄せられた。

さらに、専門家委員より Cu 含有量が中程度以上の鋼材で Cu 原子を含まない溶質原子クラスターが形成される知見が得られているか質問があった。これに対し、電中研の委員より Cu 原子が溶質原子クラスターに集積し尽くした後、新たに Cu 原子を含まない Ni-Mn-Si クラスターが形成されることを考えられるが、これはプラントの供用期間を超えるようなかなりの高照射量に達してはじめて顕在化する現象と考えられるとの回答があった。

- JNESのPREプロジェクトにおいて試験炉照射(照射量 $3.1 \sim 13.0 \times 10^{19} [\text{n}/\text{cm}^2]$)された多様な組成(Cu:0.02~0.25wt%、Ni:0.59~1.78wt%)の鋼材についてアトムプローブ分析により溶質原子クラスター体積率(V_f)の平方根を評価した結果、遷移温度移行量と $\sqrt{V_f}$ との間に良好な線形の相関が認められている。

TABLE 2—Irradiation conditions and mechanical property changes.

ID	Chemical Composition				Fluence ($\times 10^{19} \text{n}/\text{cm}^2$)	Flux ($\times 10^{12} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)	ΔRT_{NDT} (°C)	$\Delta FATT$ (°C)	USE (J)	ΔUSE (J)	ΔHv	SD of ΔHv
	Cu	Ni	P	Si								
B1-1	0.21	0.63	0.009	0.17	3.1	5	106	96	87	17	16	25
B1-2	0.21	0.63	0.000	0.00	6.4	5	125	108	78	26	29	23
B1-3	0.21	0.63	0.000	0.00	12.1	5	165	142	64	40	87	20
B4-1	0.17	0.62	0.009	0.15	3.2	5	89	83	68	14	16	8
B4-2	0.17	0.62	0.000	0.00	6.4	5	119	103	64	18	71	14
B4-3	0.17	0.62	0.009	0.14	12.9	5	160	136	51	31	74	10
B5-1	0.1	0.59	0.009	0.14	3.1	5	72	65	91	11	21	25
B5-2	0.1	0.59	0.009	0.14	6.4	5	104	90	80	22	43	21
B5-3	0.1	0.59	0.009	0.14	12.0	5	137	122	73	29	72	22
B6-1	0.1	0.92	0.008	0.13	8.6	5	126	122	77	43	62	28
B7-1	0.1	0.63	0.017	0.14	8.6	5	116	105	72	21	72	29
B8-1	0.1	0.63	0.009	0.32	8.7	5	98	93	79	22	65	19
B9-1	0.04	0.62	<0.005	0.22	3.1	5	16	37	244	21	23	13
B9-2	0.04	0.62	<0.005	0.22	6.3	5	29	46	239	26	-2	9
B9-3	0.04	0.62	<0.005	0.22	12.1	5	66	77	205	60	38	16
S1-1	0.09	0.62	0.007	0.26	3.2	5	45	12	176	14	13	13
S1-2	0.09	0.62	0.007	0.26	5.9	5	79	59	168	22	35	16
S1-3	0.09	0.62	0.007	0.26	11.7	5	128	92	134	56	90	20
S1-4	0.09	0.62	0.007	0.26	3.0	0.1	...	...	...	9	17	
S1-5	0.09	0.62	0.007	0.26	6.0	0.1	...	...	...	38	26	
S2-1	0.14	0.72	0.010	0.21	4.4	5	...	...	...	21	23	
P1B-1	0.06	0.58	0.008	0.21	6.7	10	48	41	121	16	26	24
P1B-2	0.06	0.58	0.008	0.21	12.9	10	71	54	111	26	23	16
P2B-1	0.25	0.59	0.007	0.21	7.0	10	140	110	109	38	47	20
P2B-1	0.06	0.57	0.018	0.22	5.4	10	56	59	145	12	20	15
P4B-1	0.06	1.78	0.009	0.24	7.1	10	180	151	106	57	38	26
W1-1	0.2	0.88	0.016	0.30	3.3	5	119	110	103	36	40	10
W1-2	0.2	0.88	0.016	0.30	8.6	5	151	144	82	37	28	10
W1-3	0.2	0.88	0.016	0.30	11.8	5	175	164	79	60	74	10
W2-1	0.13	0.86	0.016	0.30	3.2	5	80	69	129	45	84	12
W2-2	0.13	0.86	0.016	0.30	8.9	5	139	114	111	63	70	11
W2-3	0.13	0.86	0.016	0.30	11.2	5	150	135	96	78	100	12
W3-1	0.1	0.88	0.016	0.27	3.1	5	49	60	167	28	18	9
W3-2	0.1	0.88	0.016	0.27	8.3	5	98	100	138	57	12	10
W3-3	0.1	0.88	0.016	0.27	11.3	5	131	120	126	69	48	8
W4-1	0.02	0.84	0.008	0.28	3.1	5	32	18	221	-6	9	
W4-2	0.02	0.84	0.008	0.28	9.0	5	58	58	199	63	6	11
W4-3	0.02	0.84	0.008	0.28	13.0	5	88	88	170	92	21	12

FIG. 11—Correlation between ΔRT_{NDT} and $V_f^{1/2}$.

※ 文献[21,22,23,24]

図 4.4.1-1 JNES PRE プロジェクトで得られた $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} 実測値の相関^{[17]注46), 注47)}

d. 直径 1nm 以下の溶質原子クラスターの照射脆化への寄与について

専門家委員より、APT で測定される溶質原子クラスターの平均の直径が 2~4nm の範囲となっていることについて、それ以下の大きさの溶質原子クラスターの脆化への寄与について質問があり、電中研の委員より以下の回答があった。

APT による分析では、まず対象の試料の原子マップが得られ、これに解析で溶質原子クラスターの抽出処理を行うことにより、溶質原子クラスター数密度、溶質原子クラスター直径が算出される。溶質原子クラスター数密度については、他の研究でも同程度の値が得られている。また、溶質原子クラスター直径については、溶質原子クラスターの抽出処理の際に原子が 20 個以下のものは溶質原子クラスターとして抽出しないアルゴリズムとしており、結果として溶質原子クラスターの検出下限は直径 1nm 程度となる。

以上の電中研の委員の回答に対して、専門家委員からは、直径 1nm 以下の溶質原子クラスターは数密度が高く、全溶質原子クラスター体積に比べてその体積割合は小さいが、転位障害物としての数密度が高くなるため、より硬化及び脆化に寄与するとの考え方もあることから 20 個以下を抽出しないのは不適切という意見が寄せられた。これに対し、電中研の委員よ

注46) 図中のグラフ縦軸の「 ΔRT_{NDT} 」は、遷移温度移行量(ΔT_{41J})の実測値を意味する。

注47) 図中のグラフ及び表は、ASTM International 社の許可を得て文献[17]のグラフ及び表を転載した。Reproduced, with permission from the Journal of ASTM International, Vol.6, Issue 7, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

り, 20 個という値については, 溶質原子クラスターのコア原子がランダムに分布した状態で偶然溶質原子クラスターとして抽出される個数がおおむね 20 個程度となること, この方法により抽出した溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)が遷移温度移行量(ΔT_{41J} 実測値)と線形の相関があることが確認されており, 直径 1nm 以下の溶質原子クラスターの体積率への寄与は無視できると考えられるとの回答があった。

また, 別の専門家委員より, 仮に溶質原子クラスター抽出処理のしきい値を 10 個とすると, 非現実的に多数の溶質原子クラスターが抽出され適切な結果が得られないといった評価例もあり, 多くの研究機関で 20 個程度に設定しているのが実態であること, 20 個の根拠としては APT の測定装置の分解能や原子分布といった統計的な観点から決まっていると考えられるとの補足があった。

これらに対し, 他の専門家委員からは, APT 以外の他の分析手法の検討やマトリックス損傷の考え方や溶質原子クラスターの核となる転位ループに対する ΔT_{SC} と ΔT_{MD} のアルゴリズムの検討を進めていく必要があるとの意見が寄せられた。

e. マトリックス損傷の式の機構論的な考え方

専門家委員より, 現行予測法におけるマトリックス損傷の式の機構論的な考え方について質問があり, 電中研の委員より以下の回答があった。

現行予測法のマトリックス損傷の数密度の式^[16]を図 4.4.1-2 に示す。この式は, Jones らの報告^[14]を踏まえて転位ループの数が照射量の平方根に比例し, かつ照射温度の 1 次関数となることを表す式となっており, 転位ループの数が Ni の添加により増加する影響を考慮している。また, 転位ループは照射誘起クラスターの核となるとの想定に基づき, マトリックス損傷の数密度の算出に際しては照射誘起クラスターの形成分を差し引く式となっている。

以上の電中研の委員の回答に対して, 他の専門家委員からは, むしろ全ての溶質原子クラスターの数密度から照射誘起クラスターの数密度を差し引いた照射促進クラスターを溶質原子クラスターによる寄与分, ΔT_{SC} とし, 照射誘起クラスターについてはマトリックス損傷寄与分, ΔT_{MD} とするほうがアルゴリズムとして適切であるとの意見が寄せられた。

ミクロ組織変化 $\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \quad \text{マトリックス損傷数密度}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + D_{Cu}^{irrad} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2} \quad \frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -\nu_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - \nu'_{SC} \cdot C_{SC}$	JEAC 4201-2007/2013の式
C_{MD} : MD(転位ループ)の数密度(m^{-3}) ϕ : 中性子束(n/cm^2s) F_T : 温度依存性項 $F_T=1.869-4.57\times 10^3 T(^{\circ}C)$ C_{Ni}^0 : バルクNi含有量 (wt%) C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度(m^{-3})	

図 4.4.1-2 現行予測法におけるマトリックス損傷の数密度の式^[16]

f. 溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の分類

専門家委員より、現行予測法の基本モデル式及びミクロ組織変化予測式改定案における溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の分類について、多くの照射損傷の研究者の一般的な認識と異なっているとの指摘があった。これらの式では、APTで観察される溶質原子クラスターは照射欠陥集合体との複合体を形成しているか否かによらず全て溶質原子クラスターに分類している。一方、マトリックス損傷については、主として転位ループを想定しているものの、それを核として溶質原子クラスターが形成された場合は溶質原子クラスターに分類されているが、転位ループについては溶質原子クラスターが形成されているか否かに関わらずマトリックス損傷に分類するほうが、照射損傷の研究者の認識と合致するとの趣旨である。これに対し、電中研の委員より以下の回答があった。

現行予測法の基本モデル式及びミクロ組織変化予測式改定案における溶質原子クラスターとマトリックス損傷の用語の定義を図 4.4.1-3 に示すが、改定案では、現行予測法と同様に APT により測定された溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度移行量(ΔT_{41J} 実測値)に認められる線形の相関を再現することを基本方針としており、その観点からマトリックス損傷とされる転位ループでもそれを核として溶質原子クラスターが形成された場合はその転位ループを溶質原子クラスターに分類している。また、マトリックス損傷については、透過型電子顕微鏡で観察される転位ループだけでなく、APT で溶質原子クラスターとして抽出されない照射欠陥集合体を全てマトリックス損傷と定義している。

以上の電中研の委員の回答に対して、専門家委員から溶質原子クラスターの核となる転位ループを ΔT_{SC} と ΔT_{MD} のいずれの項に含ませるかの検討が必要であるとの意見が寄せられた。

用語	定義
照射促進SC	均一核生成による溶質原子の集合体
照射誘起SC	マトリックスダメージ(下記参照)への溶質原子の偏析
マトリックスダメージ	上記以外の照射によるはじき出し損傷で形成される格子欠陥集合体

図 4.4.1-3 用語の定義(溶質原子クラスター及びマトリックス損傷)

(2) 照射脆化メカニズムとの整合に関する議論

4. 3項に示したミクロ組織変化予測式改定案について、照射脆化メカニズムとの整合の観点から議論が行われた。

a. 照射欠陥の形成に伴う硬化の機構論との整合

ミクロ組織変化予測式改定案では、現行予測法と同様の前提(溶質原子クラスター体積率の平方根 $\sqrt{V_f}$ と脆化(硬化)に比例関係が認められる)を踏襲して、溶質原子クラスターのみに着目してその指標の予測精度を精緻化しているが、それがメカニズムの理解としてより込んだ式と言えるのか専門家委員より問題提起があった。これに対し、電中研の委員より以下の回答があった。

照射欠陥の形成に伴う脆化(硬化)の機構論については依然として議論の余地が残されており、ミクロ組織変化予測式に反映できる新たな定説は確立されているわけではない。このため、改定案では現行予測法と同様に照射脆化発現機構の詳細に踏み込みます、 $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} 実測値の間に一次近似として認められる比例の相関を再現することを開発方針としている。また、溶質原子クラスターについては国内プラントの監視試験片の APT 分析によりデータの蓄積が進んでおり、この点も踏まえてミクロ組織変化予測式を見直した結果、溶質原子クラスターに関する指標の予測精度を向上させた予測が可能となったことから、導出された関数形については物理的要因の如何に関わらず、一定の説明性があるものと考えられる。

以上の電中研の委員の回答に対して、「一定の説明性」の認識が問題提起した専門家委員と異なっているのではないかとの指摘があり、電中研の委員より以下の回答があった。

脆化予測法において最も重要な点は ΔT_{41J} 実測値を系統的に矛盾なく予測できることであるとの認識は問題提起した専門家委員と一致している。問題提起は改定案で考慮されていない照射脆化メカニズムや今後明らかにすべき課題を明確にする観点からなされたと理解しており、今後の研究で新たに反映すべき照射脆化メカニズムに関する知見が得られた段階で脆化予測法への反映を検討することが述べられた。

また、別の専門家委員より、脆化予測法は照射脆化メカニズムと切り離して考えているのかとの質問があり、開発に際しては照射脆化メカニズムを念頭に置くものの、実際に定式化する段階で仮定をおいて簡略化している部分があり、その観点では切り離して考えていることになると、電中研の委員より回答があった。

b. 照射欠陥の強度の違いの影響の考慮

専門家委員より、ミクロ組織変化予測式については、照射欠陥の種類に応じた硬化への寄与の違いを考慮してモデル化したほうが、より照射脆化メカニズムと整合した基本モデル式となるのではないかとの問題提起があった。例えば転位ループは Ni-Mn-Si クラスターよりも硬化への寄与が大きいことから、遷移温度移行量を求めるときは硬化に対する寄与が近いもの同士で分けるほうが適切である。また、溶質原子クラスターは最初の起源が均一核生成か不均一核生成かに応じて照射促進クラスターと照射誘起クラスターに分類しているが、その後照射量が増えて形態が変化しても分類は変えておらず将来的には改善の余地があるのではないかとの意見が寄せられた。

この点について電中研の委員より、個々の照射欠陥の強度が異なる可能性や溶質原子クラスターの成長過程を考慮すべきとの議論はあるものの、現在の APT の分析装置や透過型電子顕微鏡を用いた観察では識別が難しい部分があり、将来の研究課題と考えているとの回答があった。

(3) 脆化予測法改定案の規格化に向けての留意点

4. 3. 3項に示したミクロ組織変化予測式改定案について、今後規格化していく上で留意が必要と考えられる事項について専門家委員から指摘があった。

a. ミクロ組織変化予測式改定案の検証について

専門家委員より、ミクロ組織変化予測式改定案について、例えば溶質原子クラスター体積率やマトリックス Cu 濃度といった溶質原子クラスターに関する指標を複数の独立した方法で求めて両者の整合性を確認することにより、改定案の検証を行なう必要があるのではないかとの指摘があった。

これに対し電中研の委員より、検討の結果、改定案では溶質原子クラスターに関する指標を複数の独立な方法で求めることはできないが、他の分析技術を活用した改定案の検証については今後検討していきたいとの回答があった。

b. ミクロ組織変化予測式改定案の規格化に際しての検討事項

専門家委員より、ミクロ組織変化予測式改定案について、照射時間のみで計算できるような式としたり、係数を統廃合するなど、規格化に際してはより簡易な式となるほうが望ましいとの指摘があった。

これに対し電中研の委員より、改定案では互いに従属した係数が多数存在しており、係数を削減する余地はあることから、規格化に向けてより簡易な式とできないか、引き続き検討していきたいとの回答があった。

なお、IET 小委員会の活動終了後に、電気協会で規格使用者の利便性向上等の観点から4. 3. 3項に示したミクロ組織変化予測式改定案(40 個の係数を有する)の式を簡素化して係数を 20 個に削減した式が提案されたが^[67]、この式の妥当性については IET 小委員会で議論していない。

4. 4. 2 遷移温度移行量予測式改定案に関する議論

遷移温度移行量予測式改定案に関する議論は、大別して初期降伏応力の違いを考慮するモデル(非線形モデル)に関する議論、並びに溶質原子クラスター及びマトリックス損傷による遷移温度移行量が短範囲相互作用するとの前提の見直し要否に関する議論の2つに分類される。以降では、それぞれの項目に関する議論内容を示す。

(1) 初期降伏応力の違いを考慮するモデルの検討

まず、電中研の委員より提案のあった初期降伏応力の違いを考慮することを目指した非線形モデルの概要を記載し、そのモデルに対する IET 小委員会における議論内容を記載する。

a. 非線形モデルの概要

現行予測法の遷移温度移行量予測式について、現状考慮されていないが遷移温度移行量の予測のさらなる改善に寄与する可能性があると考えられる諸因子の例を図 4.4.2-1 に示す。同図に示した諸因子のうち、初期降伏応力については、既往研究において影響があるとの知見^[68]が得られている。

現行予測法では、図 4.4.2-2 の右側の模式図(線形モデル)の通り、照射に伴い形成される溶質原子クラスター及びマトリックス損傷のみが転位の運動の障害物となり硬化を生じさせるとの想定で定式化されている。一方、同図の左側の模式図(非線形モデル)の通り、照射前から存在する炭化物や他の析出物及び転位についても転位運動の障害物となり、照射に伴う硬化に間接的に寄与すると考えられる。これら照射前から存在する析出物や転位については、初期降伏応力をもたらす要因と考えられることから、初期降伏応力を考慮した遷移温度移行量予測式の定式化について検討した。

今回検討した遷移温度移行量予測式を図 4.4.2-3 に示す。現行予測法では、照射後の降伏応力が初期降伏応力と照射硬化量の単純和(線形和)で表わされ、降伏応力の上昇量 = 照射硬化量となり、照射による降伏応力の上昇量の評価において初期降伏応力の影響は考慮されない。一方、今回検討した遷移温度移行量予測式(以下、非線形モデル)では、初期降伏応力(σ_y^0)を照射硬化量に対して線形的に寄与する成分 σ_L と、非線形的に寄与する成分 σ_{NL} の和として表わし、降伏応力の上昇量は照射硬化量 σ_{ID} と σ_{NL} の 2 乗和平方根から σ_{NL} を差し引いた式として表わされる。

非線形モデルに4. 3. 3項のミクロ組織変化予測式改定案を組み込んで、4. 3. 5項に示した方法で、基本モデル式の各項の係数の最適化を行なった。目的関数の各項に乘じる係数は、4. 3. 5項において最適ケースと判定された Trial#15 ($\bar{A}=0.8$, $\bar{B}=0.05$, $\bar{C}=0.1$, $\bar{D}=0$, $\bar{E}=0.05$)の組み合わせを採用した。ここで、非線形モデルで新たに導入された σ_L 及び σ_{NL} については、基本モデル式の係数と併せて最適化により決定することとし、照射の状態によらず個別の鋼材(ヒート)で同一の値となるよう鋼材ごとに値を固定して最適化した。

最適化により決定した係数及び鋼材ごとの σ_{NL} (= $\sigma_y^0 - \sigma_L$)を用い、 ΔT_{41J} を予測した結果を図 4.4.2-4 の右側のグラフに、溶質原子クラスター体積率の平方根、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度を予測した結果を図 4.4.2-5 に

示す。 ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差は 7.5°C となり、図 4.3.5-9 の下段に示した線形モデルによる結果である 10.5°C よりも減少した。ここで、仮に $\sigma_{NL} = 0$ とした場合について、 ΔT_{41J} を予測すると図 4.4.2-4 の右側のグラフの通り、予測性能は大幅に悪化することから、今回検討したケースでは、各項の係数の値及び個々の鋼材の σ_{NL} の両方が適切に最適化されないと、 ΔT_{41J} が良好に予測できないことがわかる。

また、溶質原子クラスター体積率の平方根、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度の予測性能については、図 4.3.3-17 の下段に示した見直し後の微分方程式形式のミクロ組織変化予測式と同程度となる結果が得られた。

次に、最適化により決定した σ_L 及び σ_{NL} について各種初期パラメータや化学成分含有量に対する依存性を確認するため、 $\sigma_L (= \sigma_y^0 - \sigma_{NL})$ に対する初期降伏応力(σ_y^0)、USE 初期値^{注41)}及び各化学成分(Cu, Ni, P, Si, Mn)含有量との相関を図 4.4.2-6 に示す。 σ_L はいずれのパラメータに対しても明瞭な依存性は認められなかつたが、圧延材及び溶接金属については、 $\sigma_L = \sigma_y^0$ となるデータが比較的多く σ_{NL} の寄与が限定的であることが示唆された。

■ 相関モデルに影響を及ぼす可能性があると思われる諸因子

- 初期降伏応力(初期組織)の影響※
- 照射欠陥の障害物強度の差異
- 照射欠陥の障害物強度の照射量依存性
- 硬化モデル
- ...

※ 文献[68]

図 4.4.2-1 遷移温度移行量の予測のさらなる改善に寄与すると考えられる諸因子の例

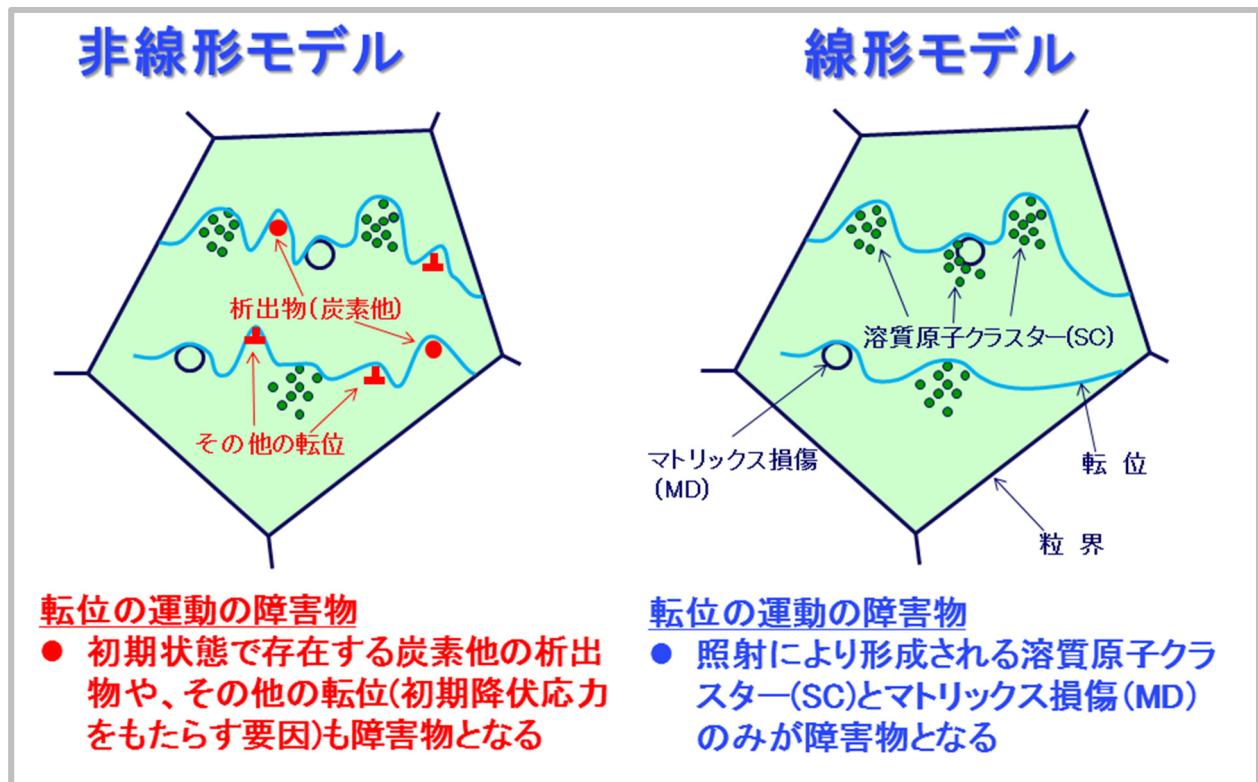


図 4.4.2-2 初期組織の照射脆化への寄与に関する模式図

■ 初期降伏応力の照射脆化への影響を考慮したモデル(非線形モデル)

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

$$\Delta \sigma_y = \left\{ \left(\sqrt{(\sigma_{NL})^2 + (\sigma_{ID})^2} + \sigma_L \right) - (\sigma_{NL} + \sigma_L) \right\}$$

$$= \left\{ \sqrt{(\sigma_{NL})^2 + (\sigma_{ID})^2} - \sigma_{NL} \right\}$$

σ_{ID} : 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)の寄与による降伏応力上昇量

$$\sigma_{ID} = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f} \right)^2 + (C_2 \sqrt{C_{MD}})^2}$$

σ_L : 初期降伏応力に線形的に寄与する硬化因子(線形成分)

σ_{NL} : 初期降伏応力に非線形的に寄与する硬化因子(非線形成分)

図 4.4.2-3 初期降伏応力の影響を考慮した遷移温度移行量予測式(非線形モデル)

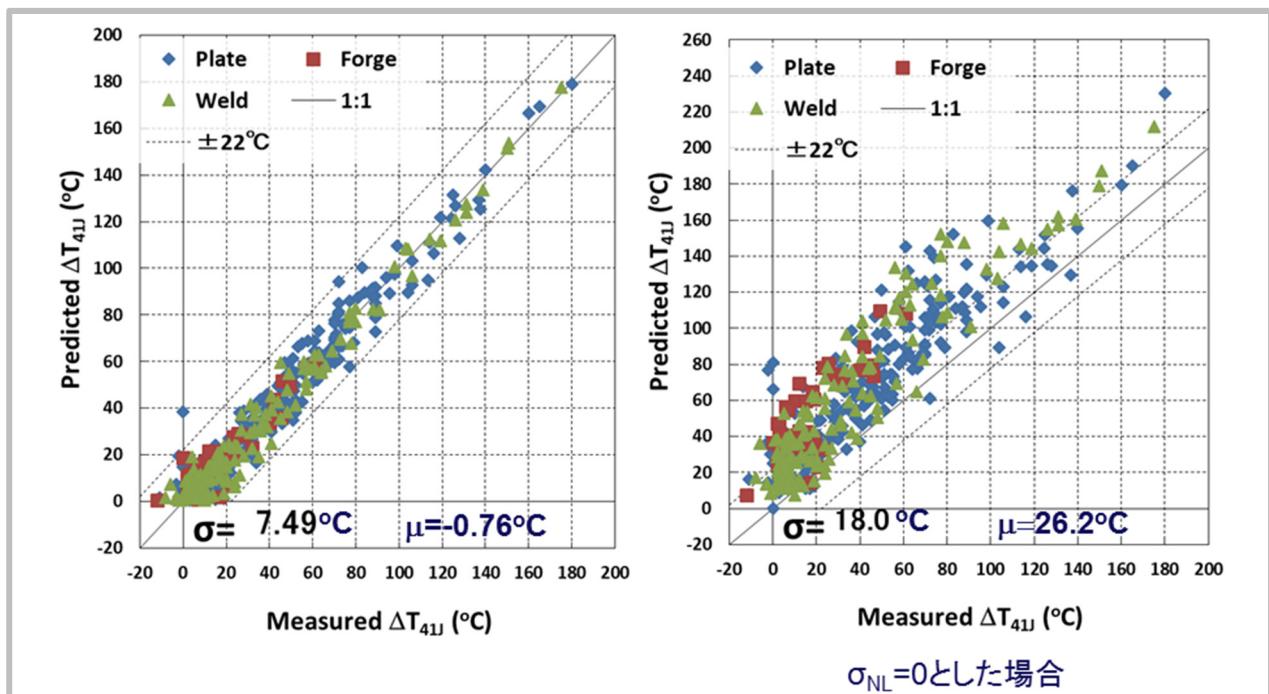
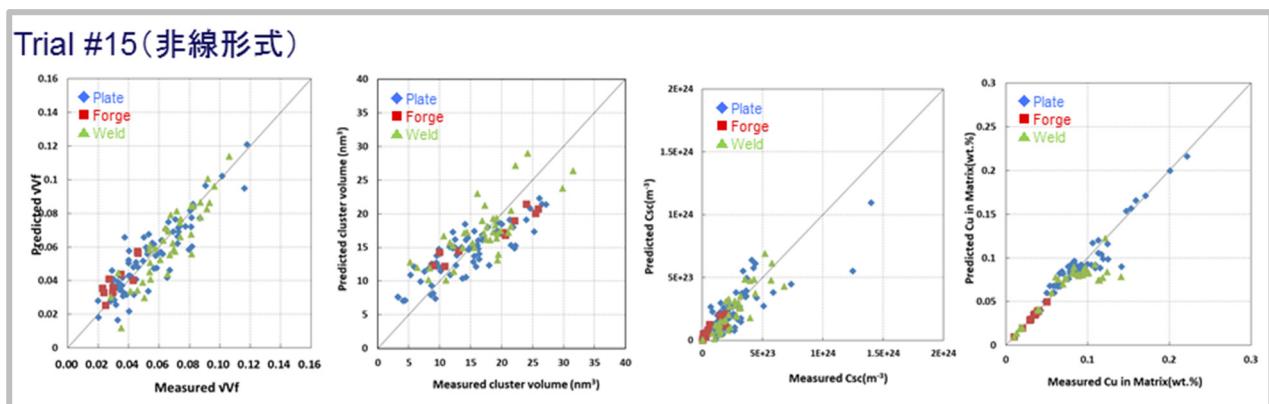
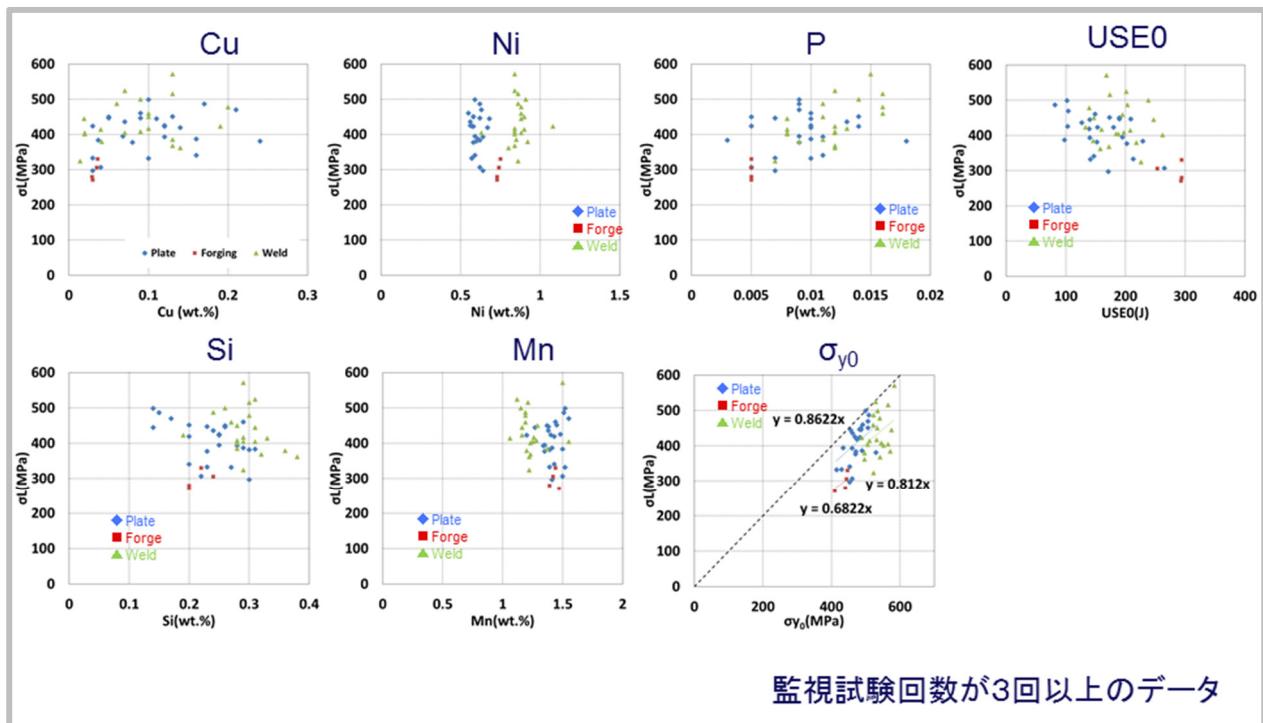
図 4.4.2-4 非線形モデルによる ΔT_{41J} の予測結果

図 4.4.2-5 非線形モデルによる溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果

図 4.4.2-6 初期降伏応力の線形寄与分(σ_L)の各パラメータに対する依存性

b. 非線形モデルに関する議論

電中研の委員より提案のあった初期降伏応力の照射硬化量への寄与を, a.に示した非線形モデルにより考慮することについて, 初期降伏応力を σ_L と σ_{NL} に分離して定式化することの是非や非線形モデルにおける σ_{NL} の決定方法について議論が行われた。

σ_L と σ_{NL} への分離は, 長範囲相互作用は線形で, 短範囲相互作用は 2 乗和の平方根(非線形)で表せるとする古典的な理論に従つたものであり, σ_L 及び σ_{NL} の値は照射前のミクロ組織(初期組織)により定まると考えられる。本来であれば, 長範囲相互作用及び短範囲相互作用のそれぞれの寄与を定量的に明らかにした上で σ_L と σ_{NL} に分離するのが理想的ではあるが, 現状知見では両者の定量的な切り分けは困難なので, 提案のあった非線形モデルでは初期降伏応力がこの 2 つに分離できるとの仮定のもとで定式化し, 個別の鋼材(ヒート)ごとに照射後のデータ(ΔT_{41J} 実測値)を用いて最適化により決定している。また, 初期組織の影響については転位の量や結晶粒径から評価することも試みられてはいるが, それを脆化予測に使えるようなレベルで積み上げて定量的に評価するのは現状知見では困難である。

これらの現状を踏まえ, 専門家委員より, 提案のあった非線形モデルで σ_{NL} を個別の鋼材(ヒート)ごとに最適化により決定するのは, 現行予測法における M_C による補正を別の形で取り入れることに相当すると理解されるが, このようなアプローチは機構論的に意味がないのではないかとの指摘があった。

このような σ_{NL} の機構論的背景が必ずしも明確でないといった指摘や, JEAC4201 の脆化予測法として採用する上では照射後データのない鋼材に対する σ_{NL} の推定方法等の運用面の課題を解決する必要があることを踏まえて, 電中研の委員より, a.に示した非線形モデルについては, 今回の脆化予測法改定案では採用を見送ることとするが, 初期特性を考慮した遷移温度移行量予測式の定式化については, 引き続き今後の研究課題として検討していく旨回答があった。

(2) ΔT_{SC} と ΔT_{MD} の二乗和平方根の考え方

4. 3. 4項に示した遷移温度移行量予測式では、現行予測法と同様に照射欠陥が短範囲相互作用するとの古くからの理解^[69]を踏まえて、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷による遷移温度移行量の二乗和平方根で表している。これについて、専門家委員より、その根拠や見直し要否について質問があったことから、電中研の委員により、 ΔT_{SC} と ΔT_{MD} を線形和(単純和)としたケースを試算して相違の有無を確認した結果が示された。

試算した遷移温度移行量予測式のケースを図 4.4.2-7 に示す。今回の追加検討では、マトリックス損傷の寄与を考慮しない(ΔT_{SC} のみ)ケース及び線形和($\Delta T_{SC} + \Delta T_{MD}$)としたケースの2種類について試算した。この2種類の遷移温度移行量予測式に4. 3. 3項のミクロ組織変化予測式改定案を組み込んで、4. 3. 5項に示した方法で、基本モデル式の各項の係数の最適化を行なった。目的関数の各項に乘じる係数は、4. 3. 5項において最適ケースと判定された Trial#15 ($\bar{A}=0.8$, $\bar{B}=0.05$, $\bar{C}=0.1$, $\bar{D}=0$, $\bar{E}=0.05$)の組み合わせを採用した。

最適化により決定した係数を用いて得られた式により ΔT_{41J} を予測し、 ΔT_{41J} 実測値と比較した。 ΔT_{SC} のみとしたケースの結果を図 4.4.2-8 に、線形和としたケースの結果を図 4.4.2-9 に示す。追加検討した2ケースのいずれも予測残差の標準偏差は 10.5°C となり、2乗和平方根としたケースとほぼ同じ結果となった。追加検討したケースの違いを明らかにするため、 ΔT_{SC} のみあるいは線形和としたケースにおける ΔT_{41J} の予測結果を、2乗和平方根としたケースと比較して図 4.4.2-10 に示す。線形和としたケースでは2乗和平方根としたケースとの差がほとんど見られなかつたが、 ΔT_{SC} のみとしたケースについては、 ΔT_{41J} の予測結果が $\Delta T_{41J} < 20^\circ\text{C}$ の範囲で若干2乗和平方根としたケースよりも小さい傾向であった。

以上の追加検討により、 $\Delta T_{41J} < 20^\circ\text{C}$ の範囲では ΔT_{MD} がある程度寄与していること、線形和と2乗和平方根ではほとんど ΔT_{41J} の予測結果に差が生じないことが確認された。これらの検討結果を踏まえ、脆化予測法改定案の遷移温度移行量予測式では、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の両者は短範囲相互作用するとの一般的な理解を踏まえて、現行予測法の考え方を踏襲して2乗和平方根とする定式化を採用するのが適切と判断した。

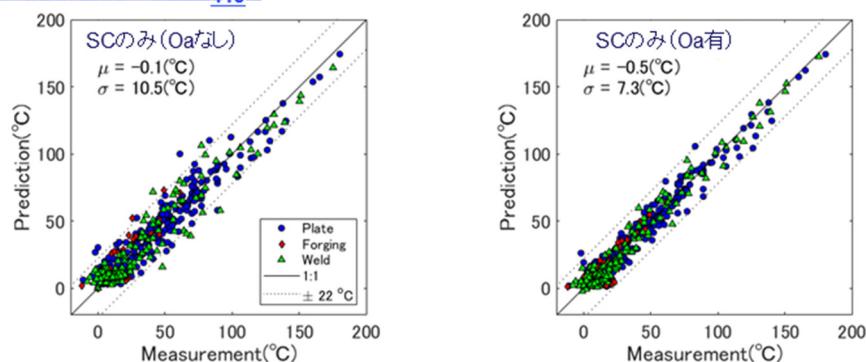
これらの追加検討結果について、専門家委員より、脆化予測法改定案におけるマトリックス損傷の定義(APT で測定できないものの総称)及び多くの照射欠陥集合体に溶質原子が付着していることが確認されているとの知見を踏まえれば、当然の結果ではあるが、将来的には溶質原子クラスターと照射欠陥集合体のそれぞれの硬化に対する寄与を明らかにした上で2乗和平方根が適切か、線形和が適切かという点も検討されることが望ましいとの意見が寄せられた。さらに、別の専門家委員より、今回の追加検討は、脆化予測法改定案の定義(溶質原子クラスターの核となる転位ループを照射誘起クラスターに分類する)に基づくマトリックス損傷については線形和と2乗和平方根で差が生じなかつたというものであり、溶質原子クラスターの核となる転位ループもマトリックス損傷に分類する一般的な定義の場合は差が生じてくることに注意が必要との指摘があつた。

■ 評価した式

1. SCの寄与のみ(VVfのみ) $\Delta T_{41J} = \Delta T_{SC} = 0.6(C_1\sqrt{V_f})$
2. 線形和 $\Delta T_{41J} = \Delta T_{SC} + \Delta T_{MD} = 0.6(C_1\sqrt{V_f} + C_2\sqrt{C_{MD}})$

図 4.4.2-7 追加検討で試算した 2 種類の遷移温度移行量予測式

遷移温度移行量(ΔT_{41J})



ミクロ組織変化

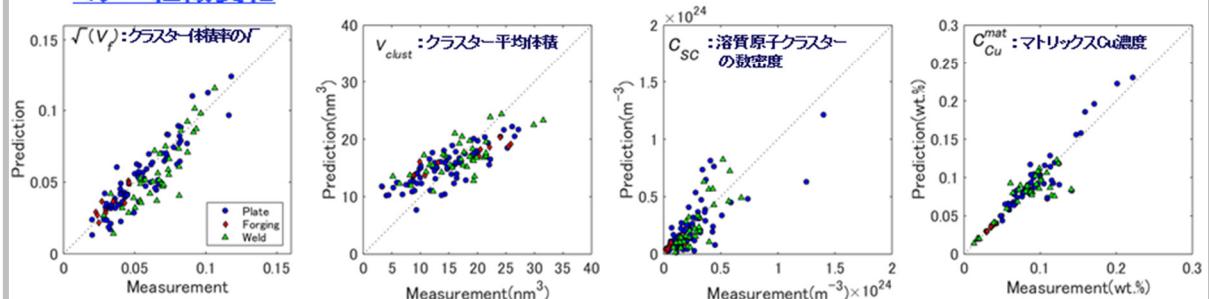


図 4.4.2-8 溶質原子クラスターによる寄与のみを考慮した遷移温度移行量予測式による
予測結果

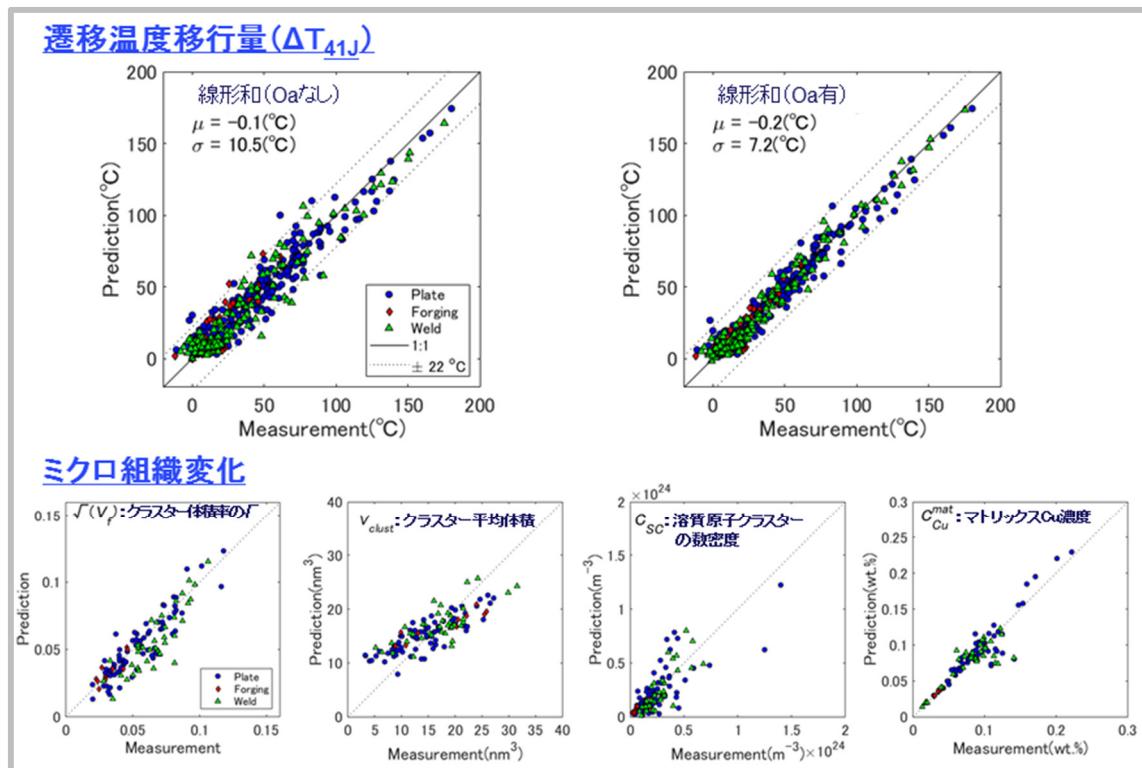


図 4.4.2-9 溶質原子クラスターとマトリックス損傷を線形和とした遷移温度移行量予測式による予測結果

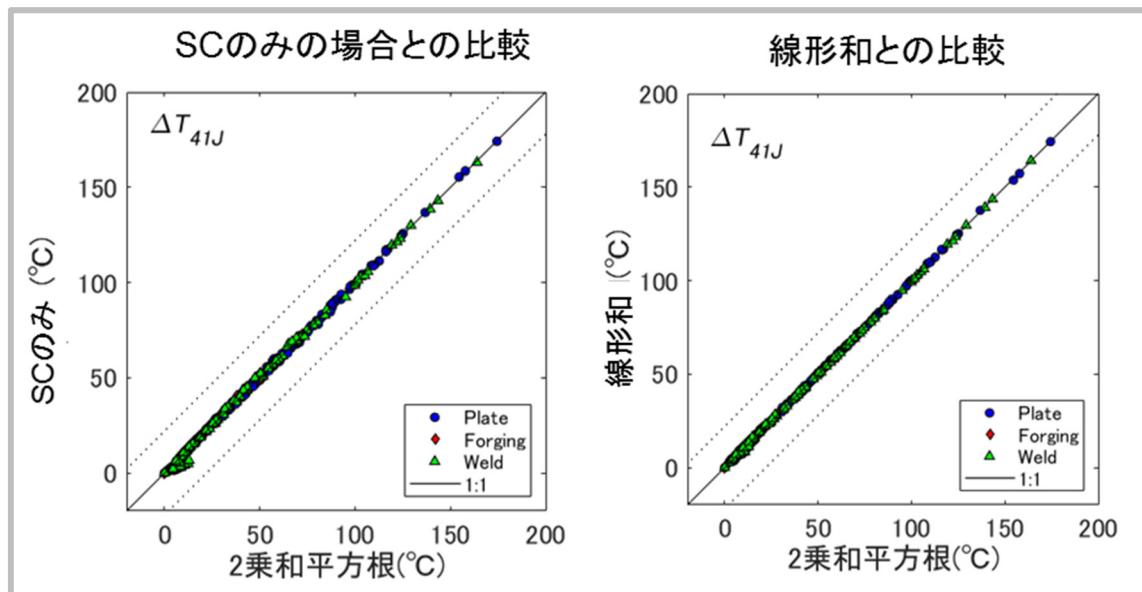


図 4.4.2-10 追加検討結果及び脆化予測法改定案による ΔT_{41J} 計算値の比較

4. 4. 3 改定案の係数最適化におけるプロセスの適切性に関する議論

本項では、2章に示した活動計画(3)に挙げられた脆化予測法改定案の係数最適化におけるプロセスの適切性に関する議論内容及びそれを受けた追加検討結果を示す。

IET 小委員会では、4. 3. 5項に示した脆化予測法改定案の係数最適化結果に関する議論において、ミクロ組織変化予測式については APT データのみを用いて決定された係数で固定してから遷移温度移行量予測式の係数のみを最適化すべきではないかとの意見や、目的関数として ΔT_{41J} 以外の指標を設ける必要性について意見が寄せられた。また、現行予測法では係数最適化に際して特に高照射量領域の遷移温度移行量の予測性を重視して ΔT_{41J} に照射時間に応じた重み付けを行なっていたが、脆化予測法改定案では重み付けを行わず最も適化を行なったことについて、その変更理由の説明が必要との意見が寄せられた。

これらの意見を踏まえて電中研の委員より追加検討を行なった結果が IET 小委員会で示された。本項では、まず(1)にミクロ組織変化予測式に係る係数を固定して最適化した結果を示し、(2)に係数最適化の目的関数を ΔT_{41J} に関する指標のみとして最適化した結果を示し、最後の(3)に係数最適化に際して現行予測法と同様の方針で ΔT_{41J} に重み付けを行なって最適化した結果を示す。

また、係数最適化のプロセスの検証の観点から、電中研が行なった脆化予測法改定案の係数最適化の計算を株原子力安全システム研究所(以下、INSS)の委員がクロスチェックした結果を(4)に示す。

(1) ミクロ組織変化予測式に係る係数を APT データのみで最適化する追加検討

4. 3. 5項に示した脆化予測法改定案の係数最適化において、ミクロ組織変化予測式及び遷移温度移行量予測式の全ての項の係数をまとめて最適化することについて、専門家委員からミクロ組織変化予測式については APT データのみで最適化して係数を決定可能であり、それで固定した上で遷移温度移行量予測式に関する係数のみを最適化すべきではないかとの意見が寄せられた。

これを踏まえ、電中研の委員より、ミクロ組織変化予測式の係数を APT データで最適化後に目的関数を ΔT_{41J} に関する項(図 4.3.5-2 に示す $Obj_{\Delta T_{41J}}$)のみとして遷移温度移行量予測式の 2 つの係数を最適化した結果が示された。最適化により決定した係数を用いて得られた式による ΔT_{41J} の予測結果を図 4.4.3-1 に示す。予測残差の標準偏差は約 15.9°C となり、脆化予測法改定案による結果(図 4.3.5-8 の右側のグラフ)と比較して大幅に悪化する結果となった。ミクロ組織変化予測式の係数は APT データに対して最適化されているが、APT の分析は比較的最近実施されるようになってきたこともあり、APT データのある試料が比較的照射量の高い監視試験片に偏っている。このため、APT データで最適化されたミクロ組織変化予測式は照射量の低い監視試験データに対する予測精度が十分でない可能性があると評価された。この追加検討から、国内プラントの監視試験データを全体的に良好に予測するためには、ミクロ組織変化予測式と遷移温度移行量予測式の係数をまとめて最適化する必要があることが示された。

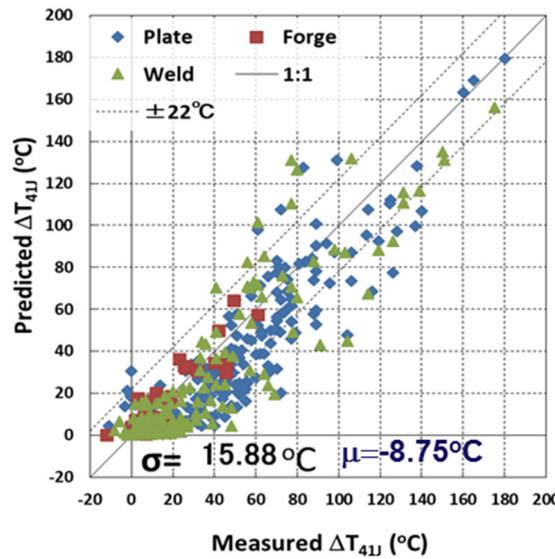


図 4.4.3-1 ミクロ組織変化予測式と遷移温度移行量予測式の係数最適化を
2段階で実施して得られた式による ΔT_{41J} の予測

(2) ΔT_{41J} の予測残差のみを目的関数として最適化する追加検討

4. 3. 5項に示した脆化予測法改定案の係数最適化においては、図 4.3.5-2 の目的関数に示す通り、 ΔT_{41J} の予測残差だけでなく、溶質原子クラスターに関する各指標(溶質原子クラスター体積率: V_f 、溶質原子クラスター平均体積: V_{clust} 、溶質原子クラスター数密度: C_{sc} 及びマトリックス Cu 濃度: C_{Cu}^{mat})の予測残差についても目的関数に含まれている。これについて、脆化予測法では ΔT_{41J} の予測残差のみに着目するのに、目的関数として ΔT_{41J} 以外の予測残差を考慮する必要性について専門家委員から意見が寄せられた。

これを踏まえ、電中研の委員より、 ΔT_{41J} の予測残差のみを目的関数としてミクロ組織変化予測式と遷移温度移行量予測式の係数をまとめて最適化した結果が示された。ここでの目的関数は(1)と同様に ΔT_{41J} に関する項(図 4.3.5-2 に示す $Obj_{\Delta T_{41J}}$)のみとなる。最適化により決定した係数を用いて得られた式による ΔT_{41J} の予測結果を図 4.4.3-2 に、溶質原子クラスター体積率の平方根、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度の予測結果を図 4.4.3-3 に示す。予測残差の標準偏差は 9.3°C となり、脆化予測法改定案による結果(図 4.3.5-8 の右側のグラフ)よりも小さくなる結果となったが、溶質原子クラスターに関する各指標は、脆化予測法改定案による結果(図 4.3.5-9 の下段のグラフ)と異なり、ほとんど予測できない結果となった。この追加検討より、目的関数を ΔT_{41J} の予測残差のみとする、 ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する指標の両方を良好に予測できるようにするとの脆化予測法改定案の開発方針を満足する結果が得られず妥当性の根拠に乏しいことから、係数最適化に際しては目的関数に溶質原子クラスターに関する各指標の予測残差も含める必要があることが示された。

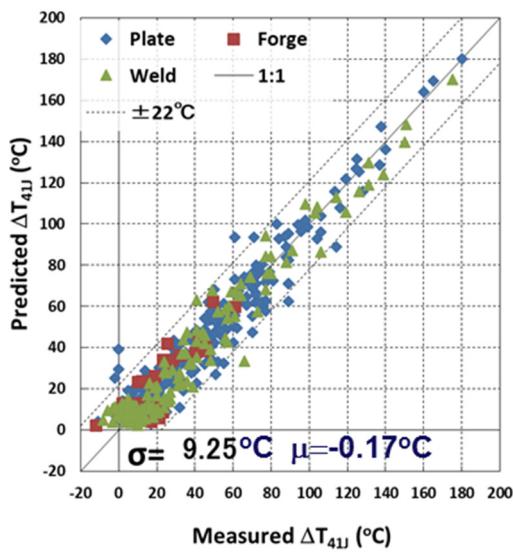


図 4.4.3-2 ΔT_{41J} の予測残差のみを目的関数とした係数最適化で
得られた式による ΔT_{41J} の予測

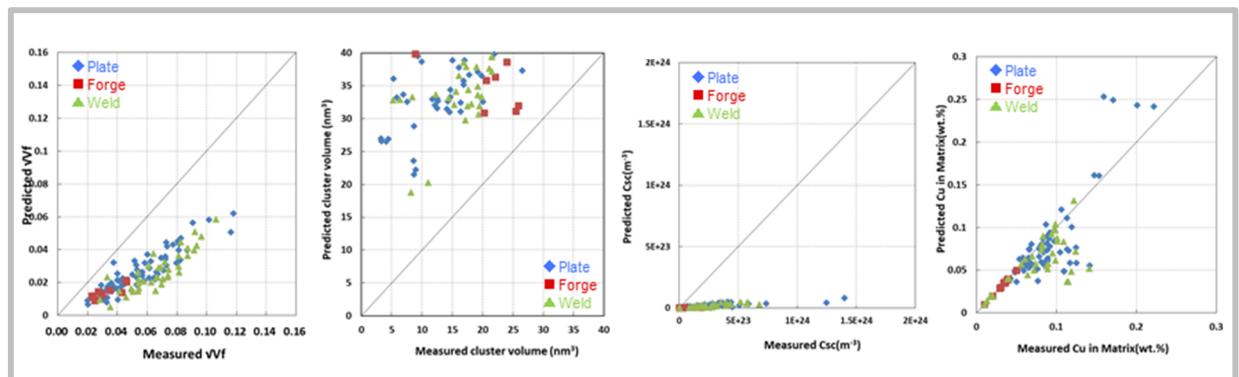


図 4.4.3-3 ΔT_{41J} の予測残差のみを目的関数とした係数最適化で得られた式による
溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果

(3) 現行予測法と同様の方針でデータに重み付けをして最適化する追加検討

現行予測法では係数最適化に際して特に高照射量領域の遷移温度移行量の予測性を重視して ΔT_{41J} に関する指標に照射時間の2乗に応じた重み付けを行なっていたが、4.3.5項に示した係数最適化では重み付けを行わずに最適化を行なったことについて、専門家委員から変更理由の説明が必要との意見が寄せられた。

これを踏まえ、電中研の委員より、最適化に用いるデータ(ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標)に対して重み付けして最適化した結果が示された。この追加検討では、 ΔT_{41J} に関する項のみ照射時間(監視試験データについては個々のデータの EFPY^{注11)}、試験炉照射データについては一律 15EFPY)の2乗で重みを付けたケース(検討条件 1:現行予測法の係数最適化と同じ方法)と、 ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標の両方に同様の重みを付けたケース(検討条件 2)の 2 ケースが検討された。これら両ケースの検討条件を表に整理して、図 4.4.3-4 に示す。目的関数の各項に乘じる係数は、4.3.5項において最適ケースと判定された Trial#15 ($\bar{A}=0.8$, $\bar{B}=0.05$, $\bar{C}=0.1$, $\bar{D}=0$, $\bar{E}=0.05$) の組み合わせである。

検討条件 1 の係数最適化に用いられた目的関数を図 4.4.3-5 に示す。ここでは、 ΔT_{41J} に関する項($Obj_{\Delta T_{41J}}$)のみに EFPY の 2 乗に基づく重み W_k を乗じている。最適化により決定した係数を用いて得られた式により ΔT_{41J} を予測し、 ΔT_{41J} 実測値と比較した結果を図 4.4.3-6 に、溶質原子クラスターに関する各指標(溶質原子クラスター体積率の平方根、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度)を予測した結果を図 4.4.3-7 に示す。また、JEAC4201-2007 及び現行予測法により溶質原子クラスターに関する各指標を予測した結果を図 4.4.3-8 に示す。これらの結果から、 ΔT_{41J} に EFPY の 2 乗で重みを付けて最適化することにより、 ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差は 10.5°C から 9.2°C に減少するが、溶質原子クラスターに関する指標のうち特に溶質原子クラスター平均体積やマトリックス Cu 濃度において予測性能が悪化することが確認された。また、JEAC4201-2007 及び現行予測法については、基本モデル式は同じであるが、JEAC4201-2007 は基本的に重み付けをせずに最適化され、現行予測法は EFPY の 2 乗で重み付けして最適化されており、係数最適化の方法が異なる。しかし、図 4.4.3-8 に示す通りいずれも溶質原子クラスター体積率の平方根以外の溶質原子クラスターに関する指標の予測性能は低く、脆化予測法改定案のように ΔT_{41J} に対する重み付けの有無で溶質原子クラスターに関する指標の予測性能は変化しないことがわかる。

検討条件 2 の係数最適化に用いられた目的関数を図 4.4.3-9 に示す。ここでは、 ΔT_{41J} に関する項($Obj_{\Delta T_{41J}}$)及び溶質原子クラスター各指標に関する項(Obj_{V_f} , $Obj_{c_{Cu}^{mat}}$, $Obj_{c_{SC}}$ 及び $Obj_{V_{clust}}$ の各項)に EFPY の 2 乗に基づく重み W_k を乗じている。最適化により決定した係数を用いて得られた式により ΔT_{41J} を予測し、 ΔT_{41J} 実測値と比較した結果を図 4.4.3-10 に、溶質原子クラスターに関する各指標を予測した結果を図 4.4.3-11 に示す。これらの結果から、 ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標の両方に EFPY の 2 乗で重みを付けて最適化を行なっても、 ΔT_{41J} の予測残差の標準偏差は 10.5°C から 10.4°C とほとんど変化せず、溶質原子クラスターに関する指標の予測性能もほとんど変化しないことが確認された。

以上、検討条件 1 及び検討条件 2 の係数最適化結果の予測性能の評価結果を、脆化予

測法改定案, JEAC4201-2007 及び現行予測法による結果と比較して図 4.4.3-12 に示す。 ΔT_{41J} の予測性能については、平均予測誤差及び予測残差の標準偏差により評価し、溶質原子クラスターに関する各指標の予測性能については、t 値の 2 乗和(図 4.3.5-5 参照)により評価した。これらの結果より、現行予測法の基本モデル式は溶質原子クラスター体積率の平方根以外の溶質原子クラスターに関する指標の予測性能が低いこと、脆化予測法改定案の基本モデル式では ΔT_{41J} に対して重み付けすることで ΔT_{41J} の予測性能は現行予測法と同程度となるが、溶質原子クラスターに関する各指標の予測性能は逆に悪化することが示された。

検討条件 1 及び検討条件 2 の追加検討から、 ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する指標の両方を良好に予測できるようにするとの脆化予測法改定案の開発方針を踏まえると、係数最適化に際してデータ(ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標)に重み付けを行わないほうが適切な結果が得られることが示された。

なお、追加検討結果について、専門家委員より、検討条件 2 において重み付けにより溶質原子クラスターに関する指標の予測性能が改善しなかったのは、APT 分析により溶質原子クラスターに関するデータが得られている監視試験片は比較的照射量の高い監視試験片に偏っており、係数最適化において溶質原子クラスターに関する指標を目的関数として考慮したことが、EFPY の 2 乗の重み付けと同様の効果をもたらしたためと考えられるとの指摘があった。

比較	検討条件1	検討条件2
用いたデータ	実機監視試験データ及び試験炉照射データ(改定提案式の最適化に用いたものと同じデータセット)	同左
用いた式	改定提案式	同左
係数フィッティングに用いる目的関数	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 係数: A=0.8, B=0.05, C=0.1, D=0, E=0.05 (Trial #15) ◆ 重み付け方針: JEAC4201-2013と同じ方針の<u>重みをΔT_{41J}に関する項に乘じた</u> ◆ 考慮した重み <ul style="list-style-type: none"> ✓ 実機監視試験データ: EFPY² ✓ 試験炉照射データ: 225 (15EFPY²相当) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 係数: 同左 ◆ 重み付け方針: JEAC4201-2013と同じ方針の<u>重みをすべての項に乘じた</u> ◆ 考慮した重み: 同左

図 4.4.3-4 係数最適化に用いるデータへの重み付けを行なう際の検討条件

目的関数

$$Obj = A \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + B \cdot Obj_{V_f} + C \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + D \cdot Obj_{C_{SC}} + E \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$A + B + C + D + E = 1$$

遷移温度移行量の寄与分 \mathbf{W}_k :重み(EFPYの2乗)

$$Obj_{\Delta T_{41J}} = \frac{\sum \mathbf{W}_k (\Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} - \Delta T_{41J,k}^{meas})^2}{\sum (\Delta T_{41J,k}^{meas})^2} \quad \Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} = \Delta T_{41J,k}^{pred} + \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta T_{41J,k}^{meas} - \Delta T_{41J,k}^{pred})}{N+1}$$

クラスター体積率の寄与分

$$Obj_{V_f} = \frac{\sum (V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum (V_f^{meas})^2}$$

クラスター数密度の寄与分

$$Obj_{C_{SC}} = \frac{\sum (C_{SC}^{pred} - C_{SC}^{meas})^2}{\sum (C_{SC}^{meas})^2}$$

マトリックスCuの寄与分

$$Obj_{C_{Cu}^{mat}} = \frac{\sum (C_{Cu}^{mat,pred} - C_{Cu}^{mat,meas})^2}{\sum (C_{Cu}^{mat,meas})^2}$$

クラスター体積の寄与分

$$Obj_{V_{clust}} = \frac{\sum (V_{clust}^{pred} - V_{clust}^{meas})^2}{\sum (V_{clust}^{meas})^2}$$

図 4.4.3-5 検討条件 1 の重み付けにおける係数最適化の目的関数

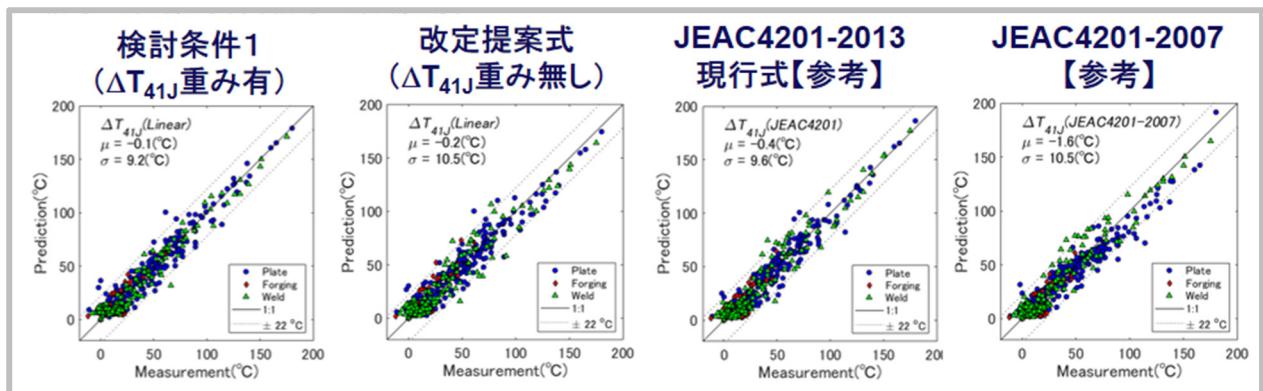


図 4.4.3-6 検討条件 1 の重み付けによる係数最適化で得られた式による ΔT_{41J} の予測結果

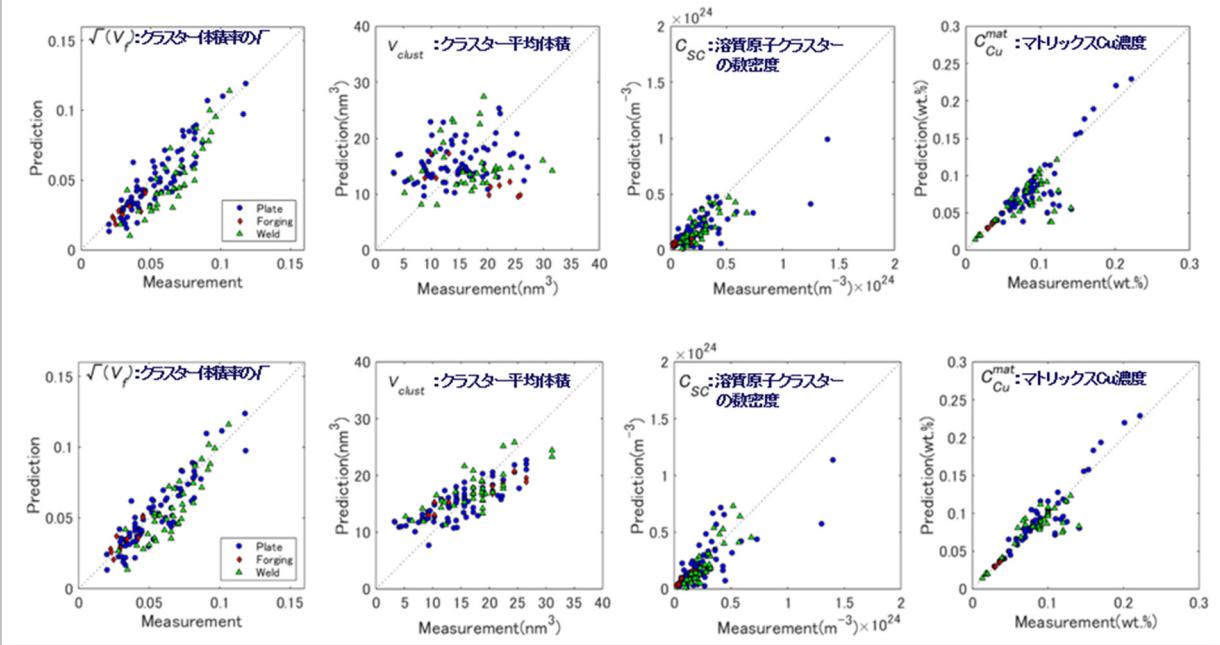
上段:検討条件1(ΔT_{41J} 重み有)、下段:改定提案式(ΔT_{41J} 重み無し)

図 4.4.3-7 検討条件 1 の重み付けによる係数最適化で得られた式による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果

上段: JEAC4201-2013現行式、下段:JEAC4201-2007

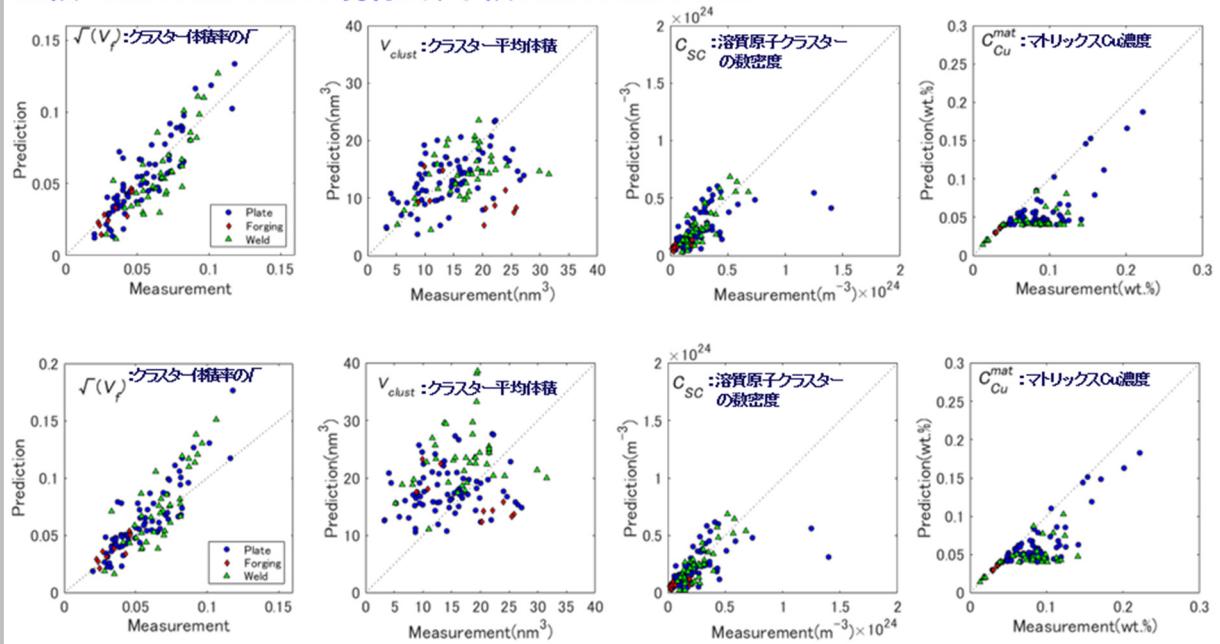


図 4.4.3-8 JEAC4201-2007 及び現行予測法による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果

目的関数

$$Obj = A \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + B \cdot Obj_{V_f} + C \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + D \cdot Obj_{C_{SC}} + E \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$A + B + C + D + E = 1$$

遷移温度移行量の寄与分 W_k :重み(EFPYの2乗)

$$Obj_{\Delta T_{41J}} = \frac{\sum W_k (\Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} - \Delta T_{41J,k}^{meas})^2}{\sum (\Delta T_{41J,k}^{meas})^2} \quad \Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} = \Delta T_{41J,k}^{pred} + \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta T_{41J,k}^{meas} - \Delta T_{41J,k}^{pred})}{N+1}$$

クラスター体積率の寄与分

$$Obj_{V_f} = \frac{\sum W_k (V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum (V_f^{meas})^2}$$

クラスター数密度の寄与分

$$Obj_{C_{SC}} = \frac{\sum W_k (C_{SC}^{pred} - C_{SC}^{meas})^2}{\sum (C_{SC}^{meas})^2}$$

マトリックスCuの寄与分

$$Obj_{C_{Cu}^{mat}} = \frac{\sum W_k (C_{Cu}^{mat,pred} - C_{Cu}^{mat,meas})^2}{\sum (C_{Cu}^{mat,meas})^2}$$

クラスター体積の寄与分

$$Obj_{V_{clust}} = \frac{\sum W_k (V_{clust}^{pred} - V_{clust}^{meas})^2}{\sum (V_{clust}^{meas})^2}$$

図 4.4.3-9 検討条件 2 の重み付けにおける係数最適化の目的関数

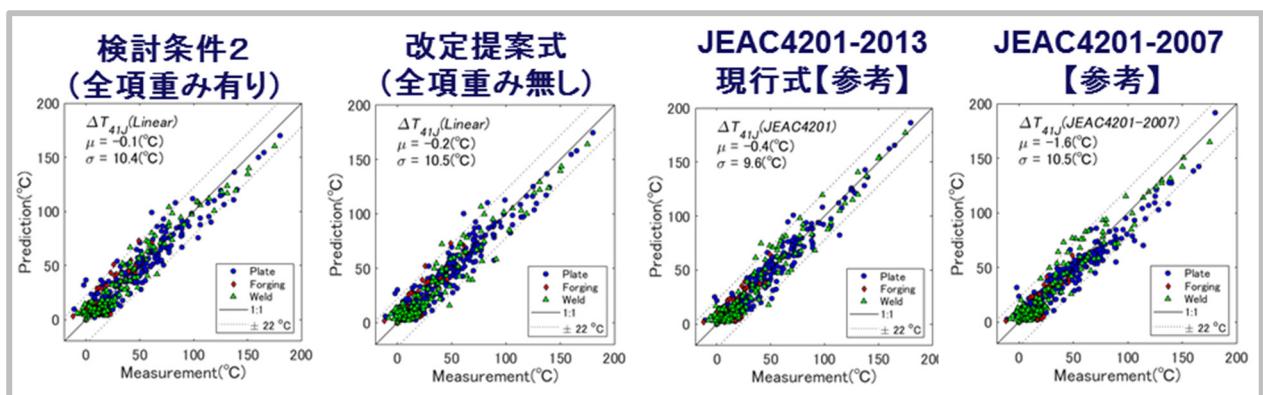


図 4.4.3-10 検討条件 2 の重み付けによる係数最適化で得られた式による ΔT_{41J} の予測結果

上段:検討条件2(全項重み有)、下段:改定提案式(全項重み無し)

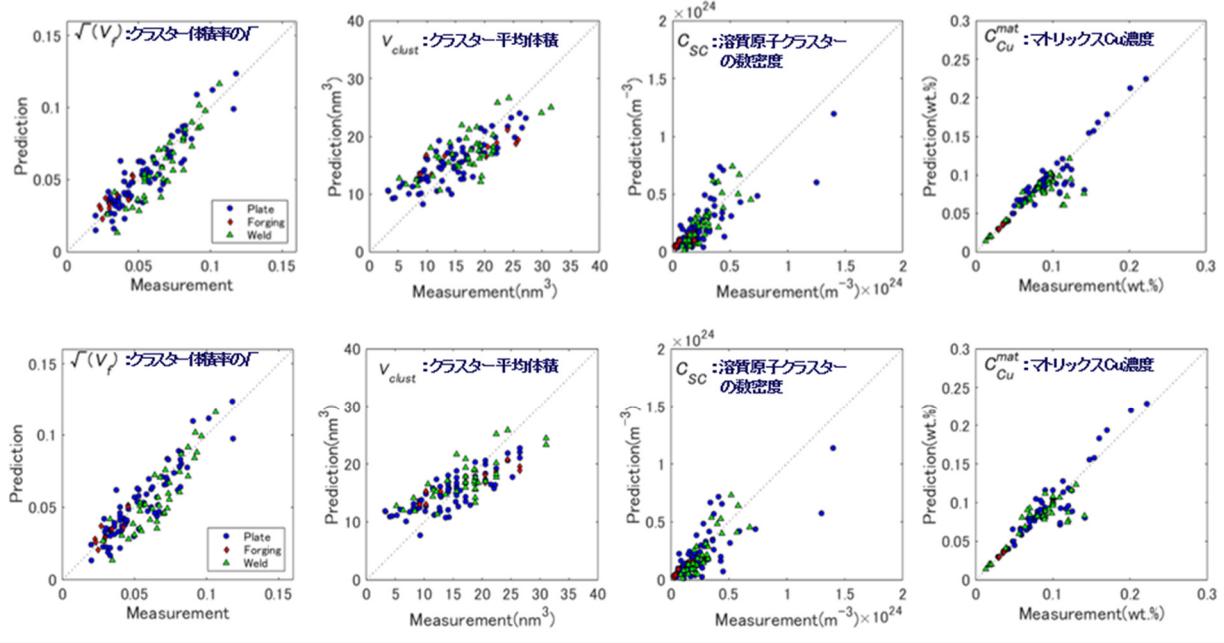


図 4.4.3-11 検討条件 2 の重み付けによる係数最適化で得られた式による溶質原子クラスターに関する各指標の予測結果

■ 遷移温度移行量(ΔT_{41U})に対する予測性能

単位:°C

予測残差	平均 μ	標準偏差 σ	備考
改定提案式	-0.2	10.5	(重み無し)
ΔT_{41U} の項に重み付け(検討条件1)	-0.1	9.2	(現行式と同じ方針)
全項に重み付け(検討条件2)	-0.1	10.4	
JEAC4201-2007	-1.6	10.5	
JEAC4201-2013現行式	-0.4	9.6	(重みあり)

■ すべての項^(※)に対する予測残差に対するt値の2乗和

※:遷移温度移行量及びミクロ組織に関する物理量

予測残差	t値の2乗和	備考
改定提案式	240	(重み無し)
ΔT_{41U} の項に重み付け(検討条件1)	642	(現行式と同じ方針)
全項に重み付け(検討条件2)	285	
JEAC4201-2007	1136	
JEAC4201-2013現行式	693	(重みあり)

図 4.4.3-12 検討条件 1 及び 2 の重み付けで得られた式並びに脆化予測法改定案の予測性能の比較

(4) 係数最適化の第 3 者検証の取り組み

4. 3節に示した脆化予測法改定案は、現行予測法と同様に電中研が開発を進めており、4. 3. 5項に示した係数最適化についても電中研で構築した国内プラントの監視試験結果及び試験炉照射データのデータベースを対象として実施されている。係数最適化プロセスの検証のため、国内全電力会社及び電中研が係数最適化に用いたデータを INSS の委員に開示し、係数最適化のプロセスをクロスチェックする取り組みが進められた。INSS の委員により、その結果が IET 小委員会で示された。

クロスチェックで用いた最適化の手法を図 4.4.3-13 に示す。また電中研が4. 3. 5項の係数最適化で用いた手法を図 4.4.3-14 に示す。今回のクロスチェックでは電中研とは異なるソフトウェア(電中研は Matlab^[70], クロスチェックでは Excel-Solver^[71])を用いて別々のアルゴリズムにより係数最適化が実施された。また、目的関数は4. 3. 5項に示した係数最適化で最も良好な結果が得られた Trial#15 の目的関数を用いた。最適化に際しては、4. 3. 5項で得られた最適化後の係数を初期値として、さらに値が変化するかという観点で計算を進めた。得られた結果を図 4.4.3-15 に示す。同図では横軸を脆化予測法改定案(電中研による最適化で得られた係数を使用)による結果、縦軸をクロスチェックの係数最適化で得られた式による結果としており、遷移温度移行量(ΔT_{41J})及び溶質原子クラスターに関する各指標(溶質原子クラスター一体積率、溶質原子クラスター平均体積、溶質原子クラスター数密度及びマトリックス Cu 濃度)の予測結果を比較した。クロスチェックによる結果を見ると溶質原子クラスター数密度が若干大きくなる傾向であり、これに伴って溶質原子クラスター一体積率もクロスチェックによる結果のほうが若干大きくなる結果となった。一方、 ΔT_{41J} の予測結果を見ると両者に差はほとんどなく、遷移温度移行量予測式で溶質原子クラスター一体積率に乘じる係数が小さめに最適化されることで差が生じなくなったと推定された。脆化予測法改定案及びクロスチェックの係数最適化で得られた式を用いて予測した結果を、それぞれ遷移温度移行量及び溶質原子クラスターに関する各指標の実測値と比較して図 4.4.3-16 に示す。実測値との比較では両者にほとんど差が見られなかった。結果として、クロスチェックの係数最適化で得られた式による結果は4. 3. 5項に示した脆化予測法改定案(電中研による最適化で得られた係数を使用)による結果とほとんど差がなく、同等の結果が得られることが確認された。

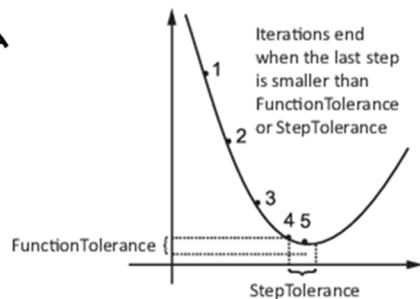
- 使用ソフト
 - Microsoft Excel 2013 – Solver機能^{※1}
 - Solverのパラメータ
 - ◆ 目的関数を最小値にする
 - ◆ 解決方法: GRG非線形
 - オプション
 - ・制約条件の精度:0.000001
 - ・集束:0.0001
 - ・微分係数:前方
 - ・マルチスタート:変数の上下限を必須にする
 - 集束の判断
 - Solverによる計算を繰返し、変数の有効数字2桁が変化しなくなった時点
- GRG法: Generalized Reduced Gradient method の略。^{※2}
線形計画問題で取り扱われていた簡約勾配法を非線形計画問題に一般化した手法

※1 文献[71]

※2 文献[72]

図 4.4.3-13 クロスチェックの際の係数最適化の方法

- 使用ソフト
 - Mathworks社製MATLAB R2019b
- アルゴリズム
 - 制約付き非線形最適化アルゴリズム
(Matlab関数:fmincon)を使用※
- 解法
 - 2次計画法(SQP)
- 判定基準
 - Function Tolerance(目的関数の値の差)が
 1×10^{-6} を下回る場合、最適化を終了する



※ 文献[70]

図 4.4.3-14 4. 3. 5項に示した脆化予測法改定案の係数最適化の方法

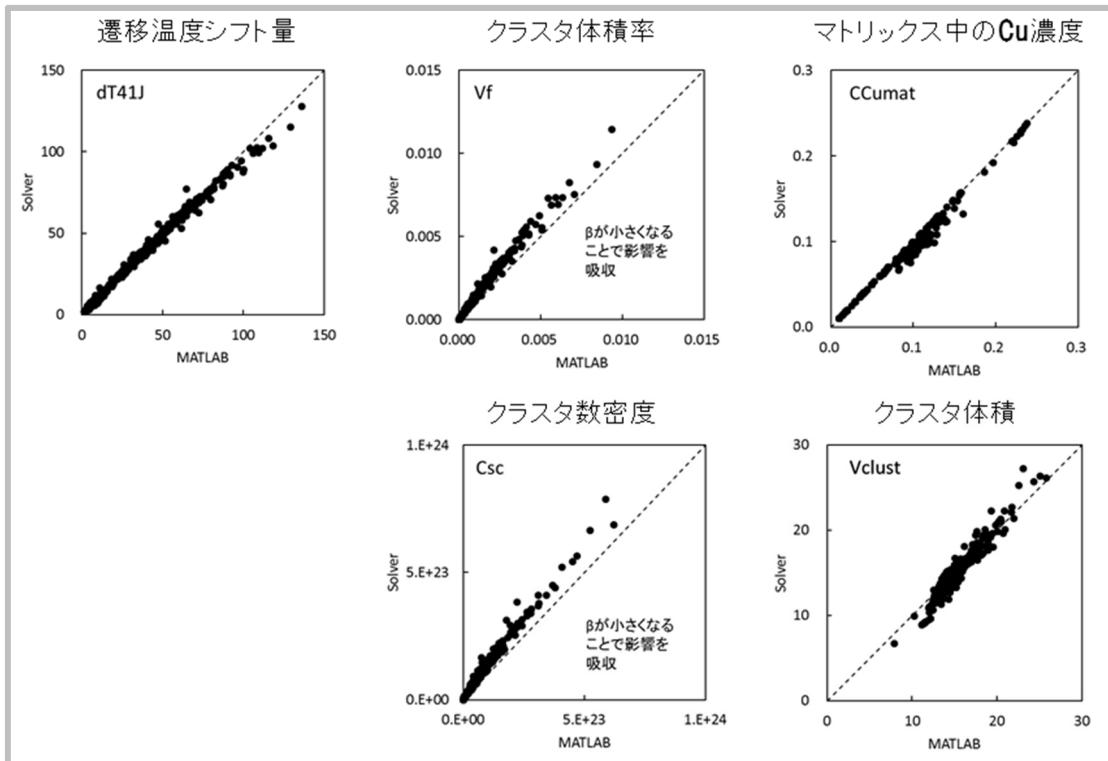


図 4.4.3-15 クロスチェックの係数最適化で得られた式及び脆化予測法改定案による予測結果の比較^{注48), 注49)}

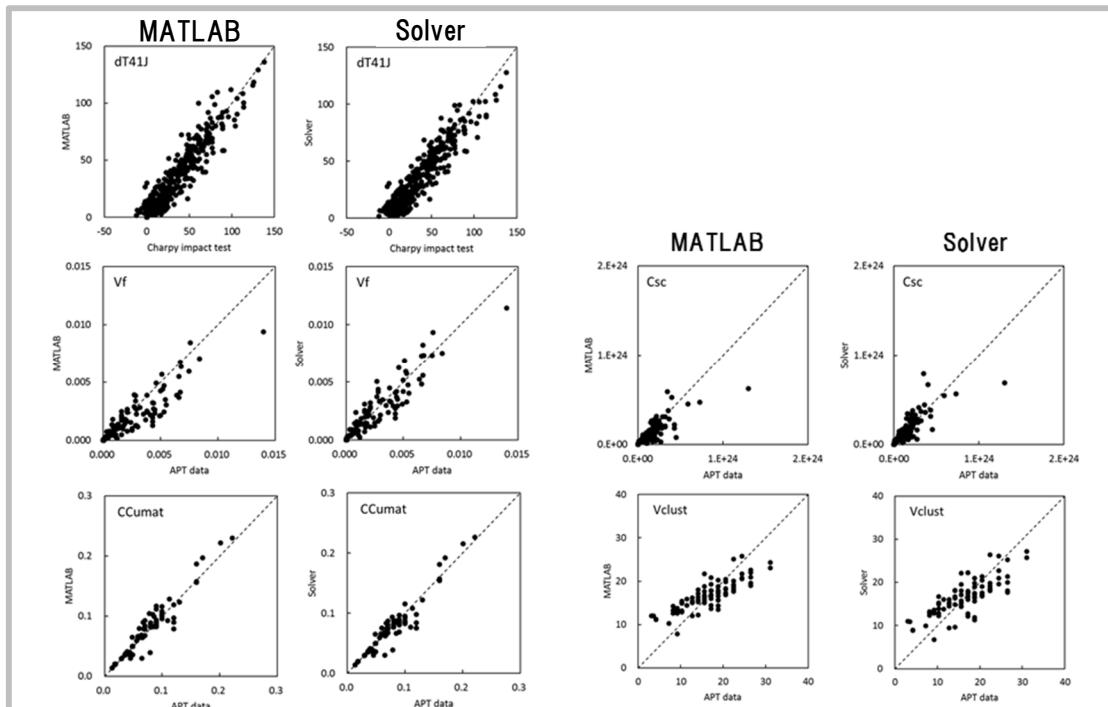


図 4.4.3-16 クロスチェックの係数最適化で得られた式及び脆化予測法改定案による予測値と実測値の比較^{注48)}

注48) 図中のグラフでは、脆化予測法改定案(電中研による最適化で得られた係数を使用)による計算結果を MATLAB, クロスチェックの係数最適化で得られた式による計算結果を Solver と表記。

注49) 図中の係数 β は図 4.3.4-1 の係数 C_1 と同一。

4. 4. 4 改定案における ΔT_{41J} 計算値の補正及びマージン設定の考え方に関する議論

本項では、4. 3. 6項に示した ΔT_{41J} の計算結果(ΔRT_{NDT} 計算値^{注 50)})の補正及びマージン設定の考え方について、IET 小委員会に寄せられた専門家委員の意見の概要を記載する。

4. 3. 6項(1)に示した通り、脆化予測法改定案では、現行予測法の M_C と同様にオフセット補正^{注 51)}を行うとの提案について、専門家委員より、オフセット補正是初期値のばらつきを補正していることに相当すると考えられるが、オフセット補正を行った場合は、別途初期値の推定誤差も考慮する必要があるとの意見が寄せられた。その観点からは、現行予測法で M_C を考慮した ΔRT_{NDT} 計算値の予測残差の標準偏差が小さくなることを根拠として、マージンを M_C を考慮しない ΔRT_{NDT} 計算値よりも小さくするのは、オフセット補正により過補正となっている可能性があることから、このようなマージンの設定方法は見直される必要がある。

また、別の専門家委員より、現行予測法の M_C 及びマージン設定の考え方には、原子炉圧力容器の評価において監視試験結果を最も重視するために、まず M_C により ΔRT_{NDT} 計算値を当該鋼材の監視試験結果の平均的な推移に沿うように補正した上で、さらに監視試験結果を必ず包含するようにマージン M_R を加算するという 2 段階のマージンで保守性を確保する仕組みと理解されるとの意見が寄せられた。

この意見を受けて、さらに別の専門家委員より、オフセット補正是一見安易過ぎる印象を与える懸念もあることから、規格策定に際してはその意義を適切に説明する必要があること、技術的には統計学に基づいた処理であることをきちんと説明する必要があり、今後の監視試験において大きなオフセット補正を必要とする結果が得られた場合には、材料科学に基づき単なるずれなのか、新たな照射脆化メカニズムによる新機軸なのかその要因を明らかにする検討が求められるとの指摘があった。

また、4. 3. 6項(2)に示した通り、脆化予測法改定案では、現行予測法で考慮している予測残差の標準偏差や平均予測誤差に加えて、測定誤差等が予測結果に与える影響を考慮して設定することを検討するとの提案について、専門家委員より、上記のオフセット補正に対する意見の通り、 ΔRT_{NDT} 計算値に対してオフセット補正を行なう場合は、オフセット補正後の予測残差の標準偏差に加えて初期値の推定誤差を考慮する必要があるとの指摘があった。

以上の意見を踏まえて、IET 小委員会では、図 4.3.6-4 に示した追加の監視試験の要求もあり原子炉圧力容器の照射量が基本的に監視試験結果が得られた照射量の範囲内で運転される現状においては、オフセット補正に一定の合理性があるが、現行予測法における M_C を考慮した ΔRT_{NDT} 計算値に加算するマージンの設定方法については見直される必要があると総括された。

^{注 50)} 本項では4. 3. 6項の表記との整合を図り、 ΔRT_{NDT} 計算値と表記する。

^{注 51)} 本報告書で述べるオフセット補正の算出方法は、注 40)に示した通り M_C と O_a の 2 通りの方法があるが、ここではその算出方法によらず予測残差の平均値により ΔRT_{NDT} 計算値を補正することをオフセット補正と称する。

4. 5 技術的知見等に基づくレビューを踏まえた意見

IET 小委員会での議論内容(4. 4節参照)を踏まえて最終的に提案された脆化予測法改定案(4. 3節参照)に対する意見を全委員から募集した。意見募集に際しては、幹事より脆化予測法改定案の特徴や IET 小委員会での議論経緯を踏まえて、質問項目を 6 つに分けて提示し、それらに該当しない事項や今後研究として取り組む課題についても意見を求めた。IET 小委員会の委員全員に提示した質問項目を表 4.5-1 に示す。

その結果、計 5 名の専門家委員から意見が寄せられたことから、以降(1)～(7)にそれぞれの質問項目ごとの意見の概要及びそれに対する現時点の産業界委員の回答を記載する。質問項目 No.8 に対する意見については、No.1～7 に対する意見から抽出された研究課題と併せて4. 6節に記載する。5 名の専門家委員から寄せられた意見を付録 5 に示し、IET 小委員会で紹介のあったそれらの意見に対する産業界委員の回答を付録 6 に示す。

表 4.5-1 委員に提示した質問項目

No.	質問項目
1	国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて
2	ミクロ組織変化予測式改定案で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方について
3	改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について
4	改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の 2 乗和平方根として定式化する考え方について
5	改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について
6	改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて
7	改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)
8	改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について

(1) 溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の線形の相関に着目している点

4. 1. 2項及び4. 3. 2項に示した通り、現行予測法及び脆化予測法改定案では、溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量との間の線形の相関を再現することを開発方針としている。この点については、いずれの意見も現在までに得られた国内 PWR プラント及び BWR プラントの監視試験並びに試験炉照射(加速照射)の全照射データの傾向を見る限り、全体的に線形の傾向が認められており、得られている知見の範囲では妥当と考えられるが、今後は監視試験(低照射速度)の結果により照射速度依存性を考慮した検証が必要との見解であった。

今後、さらに照射脆化メカニズムと整合した脆化予測法へと発展させていく上では、溶質原子クラスター中の原子組成や照射欠陥集合体との複合体形成の有無等により硬化への寄与(転位の運動への障害強度)が異なる可能性についても検討がなされる必要があり、将来的にはその成果を脆化予測法に反映していく必要があるとの意見が寄せられた。また、転位論に基づけば、転位運動に対する障害の強さ(強度)は、分散する障害物の平均の障害物間距離に反比例するため、溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)との間にも反比例の関係があるか検証していく必要があることや、今後現在の国内照射材のデータベースの範囲よりもさらに照射量が高くなつていけば V_f は飽和すると考えられ、その際には Ostwald 成長などの軟化を伴う過時効現象の発現が予想されたり、溶質原子クラスターの核とならない転位ループによる硬化が発現することが予想されることから、そのような各現象を脆化予測法に取り入れることや、 V_f が飽和に至る照射量の閾値に明らかにするといった研究が考えられるとの提言があった。

これらの意見に対して、電中研の委員より、溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量に線形の相関が見られる要因については、溶質原子クラスターの原子組成や照射欠陥集合体との複合体形成の有無等による影響が重畠している可能性はあるものの、現状の知見でこれらを明確に切り分けることは困難なことから、中長期的に検討していく課題としたいとの回答があった。

(2) 照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスターの核となるとの考え方

4. 1. 2項及び4. 3. 1項に示した通り、現行予測法及び脆化予測法改定案では、照射により形成された格子欠陥(マトリックス損傷)が照射誘起クラスターの核となる(不均一核生成)との想定で定式化されている。この点については、溶質原子クラスター形成の核になり得るものとして転位芯やクラウディオン等が考えられるが照射によって過飽和に導入された点欠陥のほうが溶質原子クラスターとなる確率が高いと考えられ、現状知見に照らせばおそらく妥当と考えられるとの意見が寄せられた。

今後、この点に関して、照射脆化メカニズムに関する理解を深め、妥当性を検証していく上では、転位ループやマイクロボイドとの関係が重要であり、照射温度をパラメータとして研究することが効果的との提言があった。また、現状知見を踏まえると Cu 含有量が高い場合は均一核生成のほうが支配的で、Cu 含有量が低い場合は不均一核生成のほうが支配的と考えられるが、不均一核生成の割合については、核となる照射欠陥集合体の照射初期段階における

形成過程がまだ十分に解明されておらず明らかになっていないとの指摘があった。

また、この考え方が妥当か否かという観点で議論するよりも、このような前提により定式化した脆化予測法が国内の原子炉圧力容器鋼材の平均的な脆化傾向を系統的に矛盾なく再現するという目的を達成できているかという観点で議論するほうが適切であるとの指摘があった。

これらの意見に対して、電中研の委員より、転位ループ等の照射欠陥と溶質原子クラスターの関係と併せて、不均一核生成プロセスの詳細についても照射促進クラスターと照射誘起クラスターの障害物強度の差異にも関わる内容であることから、(1)と同様に中長期的に検討していく課題としたいとの回答があった。

(3) マトリックス損傷の数密度の式の考え方

4. 3. 3項に示したミクロ組織変化予測式改定案におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものの総称)の数密度の式の考え方については、いずれの意見も妥当か否かを判断するためにはさらなる知見の拡充が必要との意見であった。具体的には、照射欠陥集合体の形成過程を実験的に明らかにした上で、早期に飽和に至るという提案式の考え方の検証が必要になるとの意見や、強度因子(α)をそれぞれの定義に基づき分類して、測定可能な因子についてはそれぞれの強度因子を実験的に明らかにすることは比較的容易であり、明らかにした上で硬化の式に取り込むことや測定できない因子については、係数最適化等の手段でその寄与を明らかにできるとの提言があった。

ただし、(2)と同様に、この考え方方が妥当か否かという観点で議論するよりも、当該の式を含む脆化予測法全体として国内の原子炉圧力容器鋼材の平均的な脆化傾向を系統的に矛盾なく再現するという目的を達成できているかという観点で議論するほうが適切であり、その目的を達成できているのであれば妥当と考えられるとの意見も寄せられた。

これらの意見に対して、電中研の委員より、照射欠陥集合体の形成過程については溶質原子クラスターの形成過程にも関係することから今後知見の拡充を進める必要があるが、APT で測定される溶質原子クラスターには様々な強度のものが混在している可能性があり、強度因子を区別してそれぞれの硬化量を算定することは現状知見では難しいとの回答があった。

(4) 溶質原子クラスター及びマトリックス損傷のそれぞれの寄与を 2 乗和平方根で定式化する考え方

4. 1. 2項及び4. 3. 3項に示した通り、現行予測法及び脆化予測法改定案では、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の両者が短範囲相互作用するとの前提に基づき、それぞれの遷移温度移行量の 2 乗和平方根で定式化している。この点については、いずれの意見も対象が短範囲(Short Range)に分布する障害物であることを踏まえれば 2 乗和平方根で妥当との意見であった。

ただし、単純和としたケースでも試算して影響を把握しておいたほうがよいとの指摘や、(3)に示した通り、溶質原子クラスター及びマトリックス損傷だけでなくより多様な欠陥種の 2 乗和平方根とする必要がある可能性や、4. 4. 2項(1)に示したような初期降伏応力の違いも寄与

する可能性があることには留意する必要があるとの意見が寄せられた。

これらの意見に対して、電中研の委員より、単純化としたケースについては、4. 4. 2項(2)に示した通り脆化予測法改定案では両者にほとんど差がないことが確認されていること、初期降伏応力の寄与については長期的に検討していく課題としたいとの回答があった。

(5) 現時点での初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断

初期降伏応力については、4. 4. 2項(1)に示した検討を踏まえて、4. 3. 4項に示した遷移温度移行量予測式改定案では現行予測法と同様に考慮しない方針としている。この点について、いずれの意見も現時点で鋼材の初期降伏応力に寄与すると考えられる結晶粒径や加工転位密度等を定量的に見積もることは現実的ではなく、また4. 4. 2項(1)に示した初期降伏応力のうち照射硬化量に対して非線形的に寄与する成分(σ_{NL})についても実体が明らかでないため、現時点では考慮せず今後の検討課題とすることに異存はないとの意見であった。

また、脆化予測法改定案において鋼材ごとにオフセット補正^{注 51)}が必要となる理由を初期降伏応力の違いによると考えるのかといった質問や、原子炉圧力容器鋼材の初期降伏応力のばらつきは一般の鋼材よりも小さいと考えられることから、差異が小さく初期降伏応力に対する依存性が明瞭に認められないとの説明のほうが適切ではないかとの意見が寄せられた。

また、初期降伏応力の照射脆化への寄与を明らかにするために必要となる熱活性化成分と非熱活性化成分の分離は非常に難しいとの指摘や、むしろ USE 初期値^{注 41)}を考慮してはどうかという提言や、将来的には脆化予測法において材料由来の不確定性と他の因子による不確定性は別々に表現できることが望ましいとの指摘があった。

これらの意見に対して、電中研の委員より、予測残差の平均値(O_a)については初期降伏応力に対して明瞭な依存性が認められておらず(図 4.3.6-8 参照)、現時点でのオフセット補正が必要となる理由を初期降伏応力の違いで説明することは想定されていないこと、4. 4. 2項(1)に示した非線形モデルでは σ_{NL} が照射後データ(ΔT_{41J} 実測値)に対する最適化により決定されており、初期降伏応力のばらつきに対する依存性を十分に説明できないとの回答があった。

また、初期降伏応力の寄与を明らかにする観点で提言のあった点についても、電中研の委員より、USE 初期値については σ_{NL} に対する明瞭な依存性が認められないこと(図 4.4.2-6 参照)が確認されていること、材料由来の不確定性とその他の因子による不確定性の切り分けについては、初期降伏応力(初期組織)の影響を前者、その他を後者といった明確な関連付けは現状困難と考えているとの回答があった。

上記を踏まえ、電中研の委員より、初期特性を考慮した遷移温度移行量予測式の定式化については、長期的に検討していく課題としたいとの回答があった。

(6) 改定案の基本モデル式の係数最適化においてデータに重み付けをしていない点

4. 3. 5項(1)に示した通り、脆化予測法改定案では、係数最適化に際して、現行予測法と異なり個々の ΔT_{41J} のデータに対して重みをつけずに最適化を行なっている。この点については、いずれの意見も重み付けを行わないほうが客観性の観点で望ましいと考えられるため、

妥当との意見であった。ただし、現行予測法では係数最適化に際して特に高照射量領域の遷移温度移行量の予測性を重視して ΔT_{41J} に照射時間に応じた重み付けを行なっていたため、変更理由の説明が必要との意見が寄せられた。これについては、4.4.3項(3)に示した通り、電中研の委員により、現行予測法と同様の方針でデータに重み付けをして最適化した検討結果が示され、 ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する指標の両方を良好に予測できるようになるとの脆化予測法改定案の開発方針を踏まえると、係数最適化に際してデータ(ΔT_{41J} 及び溶質原子クラスターに関する各指標)に重み付けを行わないほうが適切な結果が得られることが確認された。

(7) 脆化予測法改定案に対するその他の意見

表 4.5-1 に示した質問項目 No.7(No.1~6 に該当しない脆化予測法改定案に対するその他の意見)に対して、専門家委員から寄せられた意見の概要を記載する。

まず、4.3節に示した脆化予測法改定案に対する意見として、構成する複数の式について既往研究を適切に参考するなど技術根拠を整備していく必要があるとの指摘や、これらの式は今後も硬化・脆化機構が変化しないとの仮定に基づき、過去の知見やデータに基づき構築された式であり、今後長期供用プラントの監視試験データ等により硬化・脆化機構が変化しないとの前提を検証していく必要があるとの指摘があった。

さらに、脆化予測法改定案を踏まえて電気協会で JEAC4201 改定案を検討していく際には、4.4.4項に示したオフセット補正^{注 51)}に関する議論内容を適切に反映していく必要があるとの指摘や、規格化を遅滞なく進めると共に、脆化予測法改定案の考え方方がよく理解されるよう公衆への説明を尽くしてほしいといった要望があった。

また、将来脆化予測法をより照射脆化メカニズムと整合したものに見直していく上の着眼点として、予測残差の標準偏差が小さいことと脆化予測法の信頼性とは別であることを認識する必要があるとの指摘や、脆化予測法改定案で溶質原子クラスターに関する各指標を目的関数に含めずに ΔT_{41J} 実測値のみで最適化したほうが予測残差の標準偏差が小さくなるのは、まだ照射脆化メカニズムに関する現状の理解を向上させる余地があることを示唆しており、それを向上させていくことが脆化予測法の信頼性を高めることにつながることを認識する必要があるといった指摘があった。さらに、将来の脆化予測法の見直しに際しては Cu 含有量に応じて照射脆化メカニズムが異なることから、Cu 含有量により式を分けることを検討してはどうかといった提言があった。また、この点に関連して、今後廃炉材等の分析により、低中性子束で長期間照射された鋼材の照射脆化メカニズムに関する理解が進み、そのような知見が脆化予測法に反映されることが期待されるとの意見が寄せられた。

これら脆化予測法に対する意見に加えて、原子炉圧力容器の健全性を確保していく上では、照射による USE の低下についても課題がないか精査しておく必要があるとの指摘があった。

これらの意見に対して、電中研の委員より、脆化予測法改定案については意見のあった観点にも留意して引き続き検討を進めていくこと、関西電力㈱の委員より、今後電気協会での規格化に向けて IET 小委員会で提示された意見を踏まえて対応していくとの回答があった。

さらに、将来の見直しに向けた着眼点については、電中研の委員より、引き続き照射脆化メカニズムに関する理解を深めて脆化予測法のさらなる信頼性向上につなげていくことや、提案のあったCu含有量に応じた定式化という観点も今後の検討の参考にしていくとの回答があった。

なお、USE の低下については、関西電力㈱の委員より、現行の JEAC4201^[1]に国内の原子炉圧力容器鋼材の USE 低下を予測する式が規定されており、また直ちにその見直しを要する状況ではないこと、仮に評価時点における USE が 68J を下回ると予測される場合には、弾塑性破壊力学に基づき原子炉圧力容器の健全性を評価する手法が JEAC4206^[6,8]に規定されているとの回答があった。

以上(1)～(7)に示した通り、表 4.5-1 に示した質問項目 No.1～7 に対する専門家委員の意見の概要と、主として産業界委員による今後の対応事項を表 4.5-2 にまとめる。

表 4.5-2 質問項目 No.1～7 に対する専門家委員の意見の概要と今後の対応

No.1: $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} の線形の相関に着目して改定案を策定している点	
委員の意見	国内プラントの監視試験データの傾向からは線形相関の傾向が認められており、最近の試験炉照射(加速照射)データと合わせると妥当と考えられる。ただし、今後さらに脆化予測法を発展させていく上では、損傷速度の影響評価に加え、溶質原子クラスターの組成や複合体形成の有無に応じたそれぞれの硬化への寄与の違いを考慮することが望ましい。また、今後のプラントの監視試験データの蓄積により線形相関の検証に努めることが肝要である。
今後の対応	照射促進クラスター及び照射誘起クラスターの硬化への寄与の違いについては、現状の知見では実験的に区別することが難しいため、中長期的な課題として対応する。
No.2: 照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方	
委員の意見	<ul style="list-style-type: none"> ・溶質原子クラスター形成の核になり得るものとして、既存の転位や照射損傷組織等が考えられるが、溶質原子と相互作用する確率が高いのは照射によって過飽和に導入された点欠陥やそれらの集合体と考えられるため、現状知見に照らせばおそらく妥当と考えられる。 ・この考え方が妥当か否かという観点で議論するよりも、この前提により定式化された脆化予測法が平均的な脆化傾向を系統的に矛盾なく再現するという目的を達成できているかという観点で議論するほうが適切。
今後の対応	不均一核生成のプロセスの詳細については、照射促進クラスターと照射誘起クラスターの障害物強度の差異にも関わる内容であることから、No.1 の対応と併せて中長期的な課題として対応する。

表 4.5-2 質問項目 No.1～7 に対する専門家委員の意見の概要と今後の対応(続き)

No.3:マトリックス損傷の数密度(C_{MD})の式の考え方	
委員の意見	<ul style="list-style-type: none"> 妥当か否かを判断するためにはさらなる知見の拡充が必要。例えば、照射欠陥集合体の形成過程を実験的に明らかにすることや、測定可能な強度因子についてそれぞれの寄与を実験的に明らかにした上で硬化の式に取り込むことが必要。 溶質原子クラスターの核となる転位ループの取り扱い(アルゴリズム)を再検討すべきである。 No.2 と同様、この考え方が妥当か否かという観点で議論するよりも、当該の式を含む脆化予測法全体として平均的な脆化傾向を系統的に矛盾なく再現するという目的を達成できているかという観点で議論するほうが適切。
今後の対応	照射欠陥集合体の形成過程についてさらなる知見の拡充が必要なため、中長期的な課題として対応する。
No.4:遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方	
委員の意見	対象が短範囲に分布する障害物であることを踏まえれば 2 乗和平方根で妥当。ただし、単純和としたケースでも試算して影響を把握しておいたほうがよい。
今後の対応	なし (4. 4. 2項(2)の通り、単純和とした試算を実施済)
No.5:改定案において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断	
委員の意見	現時点で国内鋼材の初期降伏応力と照射脆化との間に直接的な相関が確認されていないこと、また初期降伏応力を熱活性化成分と非熱活性化成分に分類してそれぞれの寄与を定量的に見積もることは現状知見では現実的でないと考えられることから、現時点で考慮しないことは妥当と思われる。一方、照射脆化の指標として初期降伏応力などの鋼材の化学組成以外の因子の寄与について検討することは重要である。
今後の対応	初期特性を考慮した遷移温度移行量予測式の定式化について、長期的な課題として対応する。
No.6:改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていない点	
委員の意見	重み付けを行わないほうが客觀性の観点で望ましいと考えられるため、妥当。ただし、現行予測法では重みづけをしていたため、変更理由の説明が必要。
今後の対応	なし (4. 4. 3項(3)の通り、現行予測法と同じ方針でデータに重み付けした試算を実施済)

表 4.5-2 質問項目 No.1～7 に対する専門家委員の意見の概要と今後の対応(続き)

No.7: その他の意見(脆化予測法改定案に対する意見)	
委員の意見	<ul style="list-style-type: none"> ・脆化予測式改定案を構成する個々の式について技術根拠の整備が必要。 ・今後の監視試験データにより硬化・脆化機構の検証が必要。
今後の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・意見のあつた観点について中長期的な課題として対応する。
No.7: その他の意見(脆化予測法改定案の規格化に対する意見)	
委員の意見	<ul style="list-style-type: none"> ・4. 4. 4項のオフセット補正に関する議論内容(オフセット補正^{注 51)}後のマージンの設定方法を見直す必要がある)の反映が必要。 ・脆化予測法改定案の考え方について公衆の理解が深まるよう説明を尽くすことが必要。
今後の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・電気協会における JEAC4201 改定案の検討の際に、上記の意見に留意して検討を進める。
No.7: その他の意見(将来の脆化予測法の見直しに向けた意見)	
委員の意見	<ul style="list-style-type: none"> ・依然として照射脆化メカニズムに関する理解を向上させる余地があること、予測残差の標準偏差が小さいことと脆化予測法の信頼性とは別であることを認識して、適宜脆化予測法の見直しの検討を行うことが必要。 ・低中性子束で長期間照射された鋼材の照射脆化メカニズム(照射硬化・脆化の照射速度依存性)に関する理解を深めることが望ましい。 ・照射量の増大に伴う照射脆化メカニズムの変化(照射量依存性)に留意する必要がある。
今後の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・意見のあつた観点について長期的な課題として対応する。

4. 6 レビューを踏まえた照射脆化メカニズムに関する今後の研究課題

4. 5節に示した表 4.5-1 の No.1～7 の質問項目に対して寄せられた意見や、同表の No.8 の質問項目に対して寄せられた意見を踏まえて、照射脆化メカニズムに関する今後の研究課題を本節にまとめた。以降では、一部4. 5節の記載と重複するが、今後の研究課題を集約する観点から、専門家委員より寄せられた意見を、照射欠陥の形成に関する課題、照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与の解明に関する課題及びその他の課題の 3 つに分けて列挙する。

(1) 照射欠陥の形成に関する研究課題

専門家委員から寄せられた意見のうち、照射欠陥の形成に関する研究課題を一覧にまとめて表 4.6-1 に示す。現行予測法及び脆化予測法改定案では、マトリックス損傷が照射誘起クラスターの核となると想定されていることもあり、マトリックス損傷や溶質原子クラスターとの複合体に関する知見の拡充や、マトリックス損傷や溶質原子クラスターに至る前の照射欠陥の形成過程の解明を期待する意見が多くあった。

(2) 照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与の解明に関する研究課題

専門家委員から寄せられた意見のうち、照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与の解明に関する研究課題を一覧にまとめて表 4.6-2 に示す。照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与については、溶質原子クラスターの組成や照射欠陥集合体との複合体形成の有無等に応じた硬化への寄与(転位の運動への障害強度)を明らかにすることや、照射欠陥の強化因子の定義を明確にした上で、それらの硬化への寄与を個別に設定して検討するといった意見が寄せられた。また、初期降伏応力(初期組織)の寄与に関しては、4. 4. 2項(1)に示した非線形モデルにこだわらず鋼のミクロ組織に立脚した検討などに期待する意見が寄せられた。

(3) その他の研究課題

専門家委員から寄せられた意見のうち、(1)及び(2)に該当しない研究課題としては、次の 2 点が挙げられた。

- ・遷移温度、USE 及び硬さについて相関の解明とその照射量依存性の解明
- ・4. 2. 2項(2)b に示したサブサイズ試験片による衝撃試験技術の HAZ 部への適用

また、長期供用プラントの監視試験データ等の分析により、脆化予測法改定案で想定したミクロ組織変化の妥当性の検証や、廃炉材等の分析により、低中性子束で長期間照射された鋼材から得られた知見を反映していくことに期待する意見も寄せられた。

表 4.6-1 照射欠陥の形成に関する研究課題に該当する専門家委員の意見

質問項目 No.	今後の研究課題に関連する意見
2	不均一核生成のメカニズムについては、転位ループやマイクロボイドとの関わりが重要(照射温度が強く影響すると推測される)。
	照射誘起クラスターの数密度の式について理論的なバックグラウンドの補強が必要
	核となる照射欠陥集合体の形成過程(特に照射初期段階)を明らかにして、不均一核生成の割合について定量的に明らかにする。
3	照射初期において測定不能な照射欠陥(微小な溶質原子クラスターや微細な転位ループ)の数密度の照射時間依存性(遅発性のものがあるのであればその関数形の特定)。
	損傷速度を考えると、マトリックス損傷の数密度が非常に早期に飽和に至る定式化が妥当か理論的な補強が必要。
	APT で観察不可能な微小な溶質原子クラスターは、結晶中に少なからず存在すると考えられるが、これらがクラスター化するのか溶質原子クラスターに吸収されて幾分か成長に寄与するのか明らかにする。
	将来的に、マトリックス損傷と溶質原子クラスターが同時に存在するミクロ組織(複合体)と、マトリックス損傷単独で存在するミクロ組織との切り分けが必要。今後測定精度向上やデータ情報蓄積によって理解が進むことが期待される。
8	微小クラスターの核生成と微小転位ループの相関。
	マトリックス損傷の本質の理解が特に重要。現在の研究は APT を用いた溶質原子クラスターに関する研究に偏っているが、マトリックス損傷に関する研究にも注力する必要がある。
	現時点での観察あるいは実証が不可能との前提のもと、今後の計算科学の発展により解明が期待される課題を列挙すると、 •量子論に立脚した不均一分布(電子のチャージデンシティなど) •原子間化学的相互作用が点欠陥の移動度に及ぼす効果 •粒界を含めた点欠陥や不純物の局所的分布と粒界強度への影響 が挙げられる。

表 4.6-2 照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与の解明に関する専門家委員の意見

質問項目 No.	今後の研究課題に関する意見
1	$\Delta\sigma_y \propto \sqrt{V_f}$ のみならず、 $(\Delta\sigma_y \propto \sqrt{V_f}/d_g \text{ や } \Delta\sigma_y \propto \sqrt{C_{SC} \cdot d_g})$ の硬化機構の検証が必要である。
	高経年化(高照射量領域の現象解明)に向けて、溶質原子クラスター体積率 V_f の飽和傾向の確認及び飽和後の軟化を伴う過時効現象(Ostwald 成長など)のモデル化の検討が肝要である。
	溶質原子クラスターの組成や照射欠陥集合体との複合体形成の有無等に応じた硬化への寄与(運動転位に対する障害強度)の評価方法と溶質原子クラスターの核となる転位ループに対して ΔT_{MD} のアルゴリズムを検討する必要がある。
3	各強化因子(以下の A~F)の定義を明確にした上で、それらの硬化への寄与を個別に設定して検討する。 ・因子 A: Cu クラスター(原子 20 個以上: APT 認識可能) ・因子 B: Cu 以外の溶質原子クラスター(原子 20 個以上: APT 認識可能) ・因子 C: 全ての微小な溶質原子クラスター(原子 19 個以下: APT 認識不可能) ・因子 D: 転位ループ(TEM 觀察可能) ・因子 E: 微細な転位ループ(TEM 觀察不可能) ・因子 F: 微細な空孔集合体(PAS 測定可能)
4	初期降伏応力にどのような因子がどの程度寄与しているのかに応じて、照射による硬化に違いが生じるので、この点について知見の拡充が必要である。
5	初期降伏応力を熱活性化成分と非熱活性化成分に分類することは現実的ではない。USE 初期値 ^{注41)} を考慮することも考えられる。
	初期降伏応力の違いは金属組織で考えれば、粒界、加工転位密度、(析出物や粒界析出物分布)等が挙げられる。粒界はホール・ペッチ則、加工転位はベイリー・ハーシュ則により降伏強度増加分を推定することができ、運動転位との長範囲相互作用による障害として、粒界と加工転位のそれぞれの寄与を初期降伏応力による強度増加予測に繰り込むことは可能。
	材料由来と他の因子による不確定性については、別々に定式化することが望ましい。
7	Cu 含有量に応じて、照射脆化メカニズムが異なるので、Cu 含有量の範囲を 2,3 の領域に分けて、それぞれ異なった脆化予測式とすることも考えてみてはどうか。
	脆化予測式改定案の係数最適化で、遷移温度移行量の残差のみを目的関数とすると、遷移温度移行量と溶質原子クラスターに関する指標の予測性能が両立しないのは、まだ真のメカニズムを反映しているわけではないということの証明でもある。まだ照射脆化メカニズムの理解を深める余地があることと、それが予測式の信頼を高めることにつながることを理解して、引き続き知見拡充の取り組みを進める必要がある。

表 4.6-2 照射欠陥の照射脆化(硬化)への寄与の解明に関する専門家委員の意見(続き)

8	転位ループの照射硬化における強度因子 α の検証。
	照射脆化(硬化)の照射量依存性に対する Mn, Si の寄与の解明。
	圧延材及び鍛造材の照射脆化感受性の違いの評価。
	APT 分析により得られた、溶質原子クラスター直径/数密度の評価方法と照射硬化との相関の解明。
	ミクロ組織変化と硬化の関係は、古典的モデルを適用して合うか否かの観点でのみ議論されているのが現状。研究自体を転位運動のメカニズムから再構築するなど、ブレークスルーが期待される。非線形モデルのアプローチもこれだけに捉われずに様々な検討が必要。

5. まとめ

(一社)日本溶接協会の原子力研究委員会傘下に IET 小委員会が設置され、2017 年度から 2019 年度まで 3 ヶ年に渡って活動が行われ、中性子照射脆化に関する最新知見の調査や脆化予測法改定案に対する技術的知見等に基づくレビューが行われた。4. 3節に示した脆化予測法改定案に対し、4. 4節において主要な観点ごとに専門家委員を含む全委員からの意見を集約し、改善に努めた結果、4. 5節に示した通り、照射硬化・脆化の詳細なモデル化には多くの課題が残されているものの、脆化予測法改定案の全体方針については現状知見に照らせば概ね妥当とする見解が得られた。さらに、4. 6節には、将来の脆化予測法の見直しに向けて必要となる知見を得るための研究課題を示した。

IET 小委員会の活動終了以降に、電気協会の原子力規格委員会構造分科会傘下の破壊靭性検討会で4. 3節に示した脆化予測法改定案が紹介され JEAC4201 の改定検討に活用されると共に、IET 小委員会で行われた議論の内容については、日本原子力学会の 2021 年春の年会の照射脆化予測のセッションにおいて概要が紹介された^[73]。本報告書が脆化予測法の更なる信頼性向上や照射脆化メカニズムに係る研究の今後の進展に少しでも役立てば幸いである。

6. 参考文献

- [1] 日本電気協会, 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2007[2013年追補版] (2013).
- [2] 原子力規制委員会, 日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201-2007)[2013年追補版]」に関する技術評価書 (2015).
- [3] 原子力規制委員会, 原規技発第 1510073 号 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈の一部改正について (2015).
- [4] 原子力規制委員会, 日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201-2007)[2013年追補版]」に関する技術評価を受けた今後の対応について(依頼), 原規技発第 1510191 号 (2015).
- [5] 日本電気協会, 日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201-2007)[2013年追補版]」に関する技術評価を受けた今後の対応について(依頼)(原規技発第 1510191 号)への回答について, 日電協 27 技基第 342 号 (2015).
- [6] 日本電気協会, 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編 原子力発電所用機器に対する破壊非性の確認試験方法, JEAC4206-2007 (2007).
- [7] 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈, 原規技発第 2107219 号 (2021).
- [8] 日本電気協会, 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊非性の確認試験方法, JEAC4206-2016 (2016).
- [9] 日本電気協会, 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編フェライト鋼の破壊非性参照温度 T_e 決定のための試験方法, JEAC4216-2015 (2015).
- [10] Buchalet, C. B. and Bamford, W. H., Method for Fracture Mechanics Analysis of Nuclear Reactor Vessels Under Severe Thermal Transients, ASME 75-WA/PV (1975).
- [11] Mishima, Y., Ishino, S., Ishikawa, M., Okamura, H., Yagawa, G., Hidaka, T., Yamamoto, T., Sanoh, J., Koyama, K., Iida, M., Urabe, Y., Sato, M. and Tomimatsu, M., PTS integrity study in Japan, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.58, Issue 1 (1994), pp.91-101.
- [12] 日本電気協会, 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-1991 (1991).
- [13] 日本電気協会, 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2007 (2007).
- [14] Jones, R. B. and Williams, T. J., The Dependence of Radiation Hardening and Embrittlement on Irradiation Temperature, Effects of Radiation on Materials; 17th International Symposium, ASTM STP 1270, D. Gelles, R. Nanstad, A. Kumar and E. Little, Eds., American Society for Testing and Materials (1996), pp.569-590.
- [15] 発電設備技術検査協会, 溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書[原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験] [総まとめ版] (1992).
- [16] 曽根田直樹, 土肥謙次, 野本明義, 西田憲二, 石野栄, 軽水炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の式化に関する研究 -照射脆化予測法の開発-, 電力中央研究所報告 Q06019, 電力中央研究所 (2007).
- [17] Soneda, N., Dohi, K., Nishida, K., Nomoto, A., Tomimatsu, M. and Matsuzawa, H., Microstructural Characterization of RPV Materials Irradiated to High Fluences at High Flux, Journal of ASTM International, Vol.6, Issue 7 (2009), pp.1-16.
- [18] 曽根田直樹, 中島健一, 西田憲二, 土肥謙次, 原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改良 -高照射監視試験データの予測の改善-, 電力中央研究所報告 Q12007, 電力中央研究所 (2013).
- [19] Soneda, N., Dohi, K., Nomoto, A., Nishida, K. and Ishino, S., Embrittlement Correlation Method for the Japanese Reactor Pressure Vessel Materials, Journal of ASTM International, Vol.7, Issue 3 (2010), pp.1-20.
- [20] Soneda, N., Nishida, K., Nomoto, A. and Dohi, K., Flux effect on embrittlement of reactor pressure vessel steels irradiated to high fluences, Proceedings of Fontevraud 8 (2014), 123T01.

- [21] 原子力安全基盤機構, 平成 18 年度 高照射量領域の照射脆化予測に関する報告書 (2007).
- [22] 原子力安全基盤機構, 平成 19 年度 高照射量領域の照射脆化予測に関する報告書 (2009).
- [23] 原子力安全基盤機構, 平成 20 年度 高照射量領域の照射脆化予測に関する報告書 (2009).
- [24] 原子力安全基盤機構, 平成 21 年度 高照射量領域の照射脆化予測に関する報告書 (2010).
- [25] Dohi, K., Nishida, K., Nomoto, A. and Soneda, N., Effect of Additional Irradiation at Different Fluxes on RPV Embrittlement, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2009), paper no.77658.
- [26] Dohi, K., Nishida, K., Nomoto, A. and Soneda, N., Effect of Neutron Flux at High Fluence on Microstructural and Hardness Changes of RPV Steels, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2010), paper no.25514.
- [27] 原子力安全・保安院, 第 7 回 高経年化技術評価に関する意見聴取会 資料 9 玄海 1 号機原子炉圧力容器の健全性に関する委員コメントに対する回答 (2012).
- [28] 発電設備技術検査協会, 平成 14 年度 原子力プラント機器高度安全化対策技術(重要機器等脆化評価等) 事業報告書 (2003).
- [29] Takeuchi, T., Kuramoto, A., Kameda, J., Toyama, T., Nagai, Y., Hasegawa, M., Ohkubo, T., Yoshiie, T., Nishiyama, Y. and Onizawa, K., Effects of chemical composition and dose on microstructure evolution and hardening of neutron-irradiated reactor pressure vessel steels, Journal of Nuclear Materials, Vol.402, Issue 2-3 (2010), pp.93-101.
- [30] Shimodaira, M., Toyama, T., Yoshida, K., Inoue, K., Ebisawa, N., Tomura, K., Yoshiie, T., Konstantinović, M. J., Gérard, R. and Nagai, Y., Contribution of irradiation-induced defects to hardening of a low-copper reactor pressure vessel steel, Acta Materialia, Vol.155 (2018), pp.402-409.
- [31] Yoshida, K., Shimodaira, M., Toyama, T., Shimizu, Y., Inoue, K., Yoshiie, T., Konstantinović, M. J., Gérard, R. and Nagai, Y., Weak-beam scanning transmission electron microscopy for quantitative dislocation density measurement in steels, Microscopy, Vol.66, Issue 2 (2017), pp.120-130.
- [32] Toyama, T., Kuramoto, A., Nagai, Y., Inoue, K., Nozawa, Y., Shimizu, Y., Matsukawa, Y., Hasegawa, M. and Valo, M., Effects of post-irradiation annealing and re-irradiation on microstructure in surveillance test specimens of the Loviisa-1 reactor studied by atom probe tomography and positron annihilation, Journal of Nuclear Materials, Vol.449, Issue 1-3 (2014), pp.207-212.
- [33] Kuramoto, A., Toyama, T., Nagai, Y., Inoue, K., Nozawa, Y., Hasegawa, M. and Valo, M., Microstructural changes in a Russian-type reactor weld material after neutron irradiation, post-irradiation annealing and re-irradiation studied by atom probe tomography and positron annihilation spectroscopy, Acta Materialia, Vol.61, Issue 14 (2013), pp.5236-5246.
- [34] Kotrechko, S., Dubinko, V., Stretsenko, N., Terentyev, D., He, X. and Sorokin, M., Temperature dependence of irradiation hardening due to dislocation loops and precipitates in RPV steels and model alloys, Journal of Nuclear Materials, Vol.464 (2015), pp.6-15.
- [35] Yabuuchi, K., Saito, M. and Kimura, A., Neutron Irradiation Hardening of Fe-based Binary Alloys, Materials Science Forum, Vol.654-656 (2010), pp.2911-2914.
- [36] Yabuuchi, K., Saito, M., Kasada, R. and Kimura, A., Neutron irradiation hardening and microstructure changes in Fe-Mn binary alloys, Journal of Nuclear Materials, Vol.414, Issue 3 (2011), pp.498-502.
- [37] Yabuuchi, K., Kasada, R. and Kimura, A., Effect of Mn addition on one-dimensional migration of dislocation loops in body-centered cubic Fe, Acta Materialia, Vol.61, Issue 17 (2013), pp.6517-6523.
- [38] Yabuuchi, K., Kasada, R. and Kimura, A., Effect of alloying elements on irradiation hardening behavior and microstructure evolution in BCC Fe, Journal of Nuclear Materials, Vol.442 (2013), pp.S790-S795.
- [39] Alexander, D. E., Rehn, L. E., Odette, G.R., Lucas, G.E., Klingensmith, D. and Gragg, D., Understanding the Role of Defect Production in Radiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels, Proceedings of The 9th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors (1999), pp.827-833.
- [40] Kim, B. J., Mitsui, H., Kasada, R. and Kimura, A., Evaluation of impact properties of weld joint of reactor

- pressure vessel steels with the use of miniaturized specimens, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.49, No.6 (2012), pp.618-631.
- [41] Kimura, A., Suzuki, T., Jincho, M. and Matsui, H., Dependence of Ductile-Brittle Transition Behavior on the Size of Charpy Specimen and the Location of V-Notch in the HAZ of Welded A533B PVS, Small Specimen Test Techniques, ASTM STP 1329, W. Corwin, S. Rosinski and E. Van, Eds., American Society for Testing and Materials (1998), pp.110-122.
- [42] Suzuki, T., Itoh, K., Naruse, Y., Matsui, H. and Kimura, A., Effect of Location of V-Notch on Neutron Irradiation-Induced Shift in DBTT of HAZ of Welded Pressure Vessel Steel, Effects of Radiation on Materials: 19th International Symposium, ASTM STP 1366, M. Hamilton, A. Kumar, S. Rosinski and M. Grossbeck, Eds., American Society for Testing and Materials (2000), pp.266-278.
- [43] 高見澤悠, 端邦樹, 西山裕孝, 外山健, 永井康介, PWR で照射された原子炉圧力容器鋼の微細組織分析(1)三次元アトムプローブを用いた溶質原子クラスタ分析, 日本原子力学会 2019 年秋の大会 (2019), 3O01.
- [44] Nishiyama, Y., Yamaguchi, M., Onizawa, K., Iwase, A. and Matsuzawa, H., Irradiation-Induced Grain-Boundary Solute Segregation and Its Effect on Ductile-to-Brittle Transition Temperature in Reactor Pressure Vessel Steels, Journal of ASTM International, Vol.6, Issue 7 (2009), pp.1-8.
- [45] 西山裕孝, 鬼沢邦雄, 鈴木雅秀, 原子炉圧力容器鋼の P の粒界偏析と脆化に関する検討, 日本原子力学会 2003 年秋の大会 (2003), J18.
- [46] 端邦樹, 永井康介, 西山裕孝, PWR で照射された原子炉圧力容器鋼の微細組織分析(2)オージェ電子分光を用いた粒界リン分析, 原子力学会 2019 年秋の大会 (2019), 3O02.
- [47] Ebihara, K., Yamaguchi, M., Nishiyama, Y., Onizawa, K. and Matsuzawa, H., Effect of carbon on irradiation-induced grain-boundary phosphorus segregation in reactor pressure vessel steels using first-principles-based rate theory model, Journal of Nuclear Materials, Vol.414, Issue 2 (2011), pp.328-335.
- [48] 福谷耕司, 大野勝巳, 中田早人, 原子炉容器鋼の照射組織変化, INSS モノグラフ (2001).
- [49] Kimura, A., Shibata, M., Kasada, R., Fujii, K., Fukuya, K. and Nakata, H., Assessment of Neutron Irradiation-Induced Grain Boundary Embrittlement by Phosphorous Segregation in a Reactor Pressure Vessel Steel, Journal of ASTM International, Vol.2, Issue 3 (2005), pp.1-13.
- [50] McElroy, R. J., English, C. A., Foreman, A. J., Gage, G., Hyde, J. M., Ray, P. H. N. and Vatter, I. A., Temper Embrittlement, Irradiation Induced Phosphorus Segregation and Implications for Post-Irradiation Annealing of Reactor Pressure Vessels, Effects of Radiation on Materials; 18th International Symposium, ASTM STP 1325, R. K. Nanstad, M. L. Hamilton, F. A. Garner and A. S. Kumar, Eds., American Society for Testing and Materials (1999), pp.296-316.
- [51] S. Rosinski, Review of phosphorus segregation and intergranular embrittlement in reactor pressure vessel steels (PWR MRP-19), EPRI Technical Report TR-114783 (2000).
- [52] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.99 revision 2 Radiation embrittlement of reactor vessel materials (1988).
- [53] U.S. Nuclear Regulatory Commission, 10CFR50.61a Alternate fracture toughness requirements for protection against pressurized thermal shock events (2010).
- [54] Eason, E.D., Odette, G. R., Nanstad, R. K. and Yamamoto, T., A physical based correlation of irradiation-induced transition temperature shifts for RPV steels, ORNL/TM-2006/530 (2007).
- [55] Kirk, M., A wide-range embrittlement trend curve for western reactor pressure vessel steels, Effects of Radiation on Materials; 25th International Symposium, ASTM STP 1547, T. Yamamoto, M. Sokolov and B. Hanson, eds., American Society for Testing and Materials (2012), pp.20-51.
- [56] ASTM, E900-15 Standard Guide for predicting radiation-induced transition temperature shift in reactor vessel materials, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (2015).
- [57] Todeschini, P., Lefebvre, Y., C-Bossennec, H., Rupa, N., Chas, G. and Benhamou, C., Revision of the irradiation embrittlement correlation used for the EDF RPV fleet, Proceedings of Fontevraud 7 (2010),

#A084-T01.

- [58] Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels (RPVs) in Nuclear Power Plants, Edited by N. Soneda, Woodhead Publishing Series in Energy; Number26 (2015).
- [59] 橋本資教, 野本明義, 世界の主要な脆化予測式による国内監視試験データの予測, 一般社団法人日本保全学会, 日本保全学会 第16回学術講演会要旨集 (2019), pp.255-256.
- [60] Takamizawa, H., Itoh, H. and Nishiyama, Y., Statistical analysis using the Bayesian nonparametric method for irradiation embrittlement of reactor pressure vessels, Journal of Nuclear Materials, Vol. 479 (2016), pp.533-541.
- [61] 高見澤悠, 塙悟史, 西山裕孝, 照射脆化データのベイズ統計解析における信頼性及び予測性に関する検討, 原子力学会 2018年秋の大会 (2018), 2C12.
- [62] Armstrong, D. A., Bakker, R., Carroll, R., Hare, C., Poole, K. T. and Rosenthal, H., Analyzing spatial models of choice and judgment with R, CRC Press (2014).
- [63] 日本電気協会, JEAC4201-2007[2013年追補版]制定案に対する意見に対する回答 (2013), <<https://nusc.jp/jeac/4201/jeac4201-2013addpc.pdf>>, (参照日 2021年12月1日).
- [64] 日本電気協会, 「JEAC4201 改訂に関する質問」に対する回答 (2019), <[https://nusc.jp/jeac/4201/JEAC4201 外部質問対応回答\(190725\).pdf](https://nusc.jp/jeac/4201/JEAC4201 外部質問対応回答(190725).pdf)>, (参照日 2021年12月1日).
- [65] Hashimoto, Y., Nomoto, A., Kobayashi, T., Nishida, K. and Soneda, N., Revision of the microstructure model of the embrittlement trend curve for Japanese RPV surveillance data, Proceedings of Fontevraud 9 (2018), 000098.
- [66] Nakasui, T. and Morishita, K., Statistical arguments towards the development of an advanced embrittlement correlation method for reactor pressure vessel materials, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 57, Issue 3 (2020), pp. 312-322.
- [67] 橋本資教, 佐伯綾一, 野本明義, 中島健一, 大厩徹, 高田泰和, JEAC4201 における関連温度移行量評価方法の見直し (3)関連温度移行量評価式の提案, 原子力学会 2021年春の年会 (2021), 1K10.
- [68] Wilford, K. and Parfitt, D., The effect of microstructure on irradiation sensitivity, IAEA technical meeting on degradation of primary components of pressurized water cooled nuclear power plants (2013).
- [69] 例えば, 木村宏, 改訂 材料強度の考え方, アグネ技術センター, (2004), pp. 326-327.
- [70] MathWorks Inc., MATLAB Documentation (2019), <<https://jp.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#bsgppl4>>, (参照日 2021年12月1日).
- [71] Microsoft Corporation, Microsoft Excel (2013), <<https://support.microsoft.com/ja-jp/office/%E3%82%BD%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%82%92%E4%BD%BF%E3%81%A3%E3%81%A6%E5%95%8F%E9%A1%8C%E3%82%92%E5%AE%9A%E7%BE%A9%E3%81%97%E3%80%81%E8%A7%A3%E6%B1%BA%E3%81%99%E3%82%8B-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>>, (参照日 2021年12月1日).
- [72] Lasdon, L. S., Warren, A. D., Jain, A. and Ratner, M., Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, Issue 1 (1978), pp.34-50.
- [73] 大厩徹, 鈴木雅秀, 福谷耕司, 高田泰和, 野本明義, 佐伯綾一, 西田憲二, 橋本資教, JEAC4201 における関連温度移行量評価方法の見直し (2)関連温度移行量評価方法の見直し検討, 原子力学会 2021年春の年会 (2021), 1K09.

日本溶接協会 原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討(IET)小委員会
委員名簿 (2020年1月時点)

No.	区分	氏名	所属
1	主査 ^{*1}	鈴木 雅秀	国立大学法人 長岡技術科学大学
2	副主査 ^{*1}	福谷 耕司	株式会社 原子力安全システム研究所
3	幹事 ^{*2}	高田 泰和	関西電力株式会社
4	幹事 ^{*2}	大厩 徹	関西電力株式会社
5	幹事 ^{*2}	廣田 貴俊	三菱重工業株式会社
6	委員 ^{*1}	橋本 直幸	国立大学法人 北海道大学
7	委員 ^{*1}	永井 康介	国立大学法人 東北大学
8	委員 ^{*1}	阿部 弘亨	国立大学法人 東京大学
9	委員 ^{*1}	福元 謙一	国立大学法人 福井大学
10	委員 ^{*1}	木村 晃彦	国立大学法人 京都大学
11	委員 ^{*1}	西山 裕孝	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
12	委員 ^{*1}	高見澤 悠	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
13	委員 ^{*2}	曾根田 直樹	一般財団法人 電力中央研究所
14	委員 ^{*2}	佐伯 綾一	一般財団法人 電力中央研究所
15	委員 ^{*2}	西田 憲二	一般財団法人 電力中央研究所
16	委員 ^{*2}	野本 明義	一般財団法人 電力中央研究所
17	委員 ^{*2}	橋本 資教	一般財団法人 電力中央研究所

18	委員※ ¹	藤井 克彦	株式会社 原子力安全システム研究所
19	委員※ ²	西野 昌芳	北海道電力株式会社
20	委員※ ²	渡辺 彬仁	東北電力株式会社
21	委員※ ²	折田 修一	東京電力ホールディングス株式会社
22	委員※ ²	神長 貴幸	東京電力ホールディングス株式会社
23	委員※ ²	伊藤 圭介	中部電力株式会社
24	委員※ ²	牧川 佳祐	北陸電力株式会社
25	委員※ ²	橋本 慎一	四国電力株式会社
26	委員※ ²	吉岡 敏行	中国電力株式会社
27	委員※ ²	山本 聰	九州電力株式会社
28	委員※ ²	浦邊 守	日本原子力発電株式会社
29	委員※ ²	蓮沼 寛之	電源開発株式会社
30	委員※ ²	片山 義紀	東芝エネルギーシステムズ株式会社
31	委員※ ²	森 敦史	東芝エネルギーシステムズ株式会社
32	委員※ ²	小畠 亨司	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
33	委員※ ²	石寄 貴大	株式会社 日立製作所
34	委員※ ²	崎間 公久	三菱重工業株式会社
35	委員※ ²	名越 康人	三菱重工業株式会社
36	委員※ ²	平野 隆	株式会社 IHI

37	委員※2	佐藤 輝嘉	株式会社 IHI
38	委員※2	高本 真一	三菱日立パワーシステムズ株式会社
39	委員※2	橋 邦彦	株式会社 日本製鋼所
40	事務局	木口 明浩	一般社団法人 日本溶接協会
41	事務局	佐々木 智子	一般社団法人 日本溶接協会

※1 専門家委員

※2 産業界委員

旧委員※3

氏名	所属※4	交代時期
伊藤 健太郎	北海道電力株式会社	第1回小委員会まで
上坂 昌生	東京電力ホールディングス株式会社	第2回小委員会まで
中川 健	日本原子力発電株式会社	第3回小委員会まで
浦木 亨弘	関西電力株式会社	第4回小委員会まで
佐々木 良太	東北電力株式会社	第4回小委員会まで
室 大志	北陸電力株式会社	第4回小委員会まで
秋山 敏也	四国電力株式会社	第4回小委員会まで
豊田 哲也	日立GEニュークリア・エナジー株式会社	第4回小委員会まで
宮田 肇	日立GEニュークリア・エナジー株式会社	第5回小委員会まで

※3 いずれも産業界委員

※4 委員在籍時点

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
平成 29 年度 第 1 回小委員会 議事概要

1. 日時:平成 29 年 6 月 12 日(月) 13:30~17:20

2. 場所:溶接会館 5 階 BC 会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、浦木幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、橋本(北大)、阿部(東大)、永井(東北大)、福元(福井大)、西山、高見澤(JAEA)、野本、西田(電中研)、藤井(INSS)、[伊藤代理]沼田(北海道電)、佐々木(東北電)、上坂(東電)、伊藤(中電)、室(北陸電)、秋山(四電)、吉岡(中国電)、山本(九電)、中川(原電)、蓮沼(電発)、平野、佐藤(IHI)、石崎(日立)、豊田(日立 GE)、高本(MHPS)、片山,[森代理]新川(東芝)、崎間、名越(MHI)、橋(JSW)、船田(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) 主査の選任及び IET 小委員会の設立趣旨の紹介
- (2) 原子炉圧力容器の照射脆化管理
- (3) JEAC4201-2007[2013 年追補版]の脆化予測モデル
- (4) 世界の照射脆化予測式の紹介および予測性能の比較

5. 議事概要

(1) 主査の選任及び IET 小委員会の設立趣旨の紹介

IET 小委員会の主査として長岡技術科学大学の鈴木委員が、副主査として INSS 福谷委員が選出された。IET 小委員会の位置づけや参加委員の資格について質問があり、以下の通り回答があった。

- ・IET 小委員会の目的は、脆化予測法改定案について了承するのが目的ではなく、特に照射脆化メカニズムとの的確性の観点から意見を出すのが目的である。
- ・IET 小委員会で出た意見は、今後産業界や電気協会での改定検討の際に議論され、その結果に応じて適宜反映される。内容によっては中長期の課題として残すものもある。
- ・IET 小委員会への参加は専門家(個人)としての参加であり、他の学協会での役職に基づく参加ではない。

(2) 原子炉圧力容器の照射脆化管理

脆化予測法による計算結果を入力値として用いる JEAC4206-2007 に基づく原子炉容器の照射脆化管理の取り組みについて紹介があった。脆化予測法に直接関係する内容ではないが、周辺状況について理解を深める観点から紹介があったものである。

(3) JEAC4201-2007[2013 年追補版]の脆化予測モデル

- 現行の脆化予測法の基本モデル式の考え方について説明があった。主な意見は以下の通り。
- ・粒界脆化については、国内の鋼材では P 濃度が低く、破面を観察しても粒界破面がほとんど認められないため、有意な影響はなく考慮不要と判断している。

- 遷移温度上昇量の算出式が $2 \sqrt{\text{乗和}}$ となっているが、単純和に比べてそれぞれの脆化要因を過小評価してしまう危険性があるので気をつけた方がよい。
- M_C 補正は、予測式との系統的なズレのすべてが初期値の誤差であると仮定することに等しいと理解しているが、本当にそうなのか。本来は、統計的な評価をきちんと議論した上で、マージン M_R に一本化すべきである。また、単に外れたからマージン M_R を大きくするというのは納得できない人が多いと思う。
- 国内鋼材の特徴を踏まえて考慮が不要とされた因子、例えば Mn 濃度についても、メカニズムに基づく予測という観点では、Mn 濃度の異なる海外データを活用して影響を検討し、メカニズムの本質にせまる努力が必要ではないか。

(4) 世界の照射脆化予測式の紹介および予測性能の比較

海外の主要な予測式と国内データに対する予測性能の比較結果について紹介があった。主な意見は以下の通り。

- 日本の予測法で P をパラメータとしていないのは、国内材料では Cu と P の相関が強く Cu と P の影響を分離できないため、パラメータとして陽にあらわしていないだけである。フランスの予測式は Cu 濃度が低い材料に最適化されており、そういう事情もあって陽に P を考慮している。
- 国内データに対して海外の予測法をそのまま適用しているが、国内データに対して最適化された 2013 年追補版の脆化予測法が最もあうのは当たり前である。検討すべきなのは、海外の予測モデルで係数を国内データに対してフィッティングしてどの程度の予測性があるかということである。

以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
平成 29 年度 第 2 回小委員会 議事概要

1. 日時:平成 29 年 9 月 25 日(月) 13:30~17:00

2. 場所:溶接会館 4 階 AB 会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、浦木幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、阿部(東大)、永井(東北大)、福元(福井大)、[西山代理]鬼沢、高見澤(JAEA)、野本、西田、橋本(電中研)、藤井(INSS)、西野(北海道電)、佐々木(東北電)、神長(東電)、伊藤(中電)、室(北陸電)、秋山(四電)、吉岡(中国電)、山本(九電)、蓮沼(電発)、平野、佐藤(IHI)、石崎(日立)、豊田(日立 GE)、高本(MHPS)、片山、森(東芝)、崎間、名越(MHI)、船田(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) 東北大学における照射脆化研究の紹介
- (2) 米国予測法(EONY 及び ASTM E900-15)の係数の国内監視試験データに対する最適化結果
- (3) アトムプローブによる中性子照射された圧力容器鋼のミクロ組織の評価
- (4) 軽水炉照射材料健全性評価研究 照射脆化予測法に係る研究の概要

5. 議事概要

(1) 東北大学における照射脆化研究の紹介

JEAC4201-2007[2013 年追補版]の脆化予測法への提言及び東北大学における照射脆化研究について紹介があった。主な意見は以下の通り。

- ・JEAC4201-2007 のモデルは、照射量が増えてもマトリックス損傷が増加しないとの結果を与える。照射誘起クラスターの項でも一部マトリックス損傷が考慮されているが、照射によりマトリックス損傷が増えないと印象を与え、誤解を招きやすい。
- ・特に実用鋼では、照射脆化の指標として用いる硬さ分布の傾向は試験荷重により変わり、大学の研究で一般的に用いられる微小試験片の場合、特に結果の解釈が難しい。
- ・マトリックス損傷については、2000 年くらいから言われているが、当時は何を指すのか明確になっていなかった。今回紹介のあった成果などでようやく見えるようになってきたという印象を受けた。
- ・世界的にアトムプローブを使った研究が主流となっているが、溶質原子クラスター以外の脆化要因にも目を向けるべき。

(2) 米国予測法(EONY 及び ASTM E900-15)の係数の国内監視試験データに対する最適化結果

第 1 回小委員会の際にコメントのあった海外の予測モデルの係数を国内データに対して最適化して予測性を比較した結果について紹介があった。主な意見は以下の通り。

- ・2013 年追補版の脆化予測法では、係数最適化に際して、規格上適用範囲外となる試験炉照射した鋼材の

データも考慮しており、例えば Ni 含有量が 1.78% の鋼材などはむしろ国内データに対して最適化した海外の予測モデルよりも良好に予測できており、適用範囲外となるデータが系統的にずれるというような傾向は見られていない。

(3) アトムプローブによる中性子照射された圧力容器鋼のミクロ組織の評価

電中研が実施しているアトムプローブによる溶質原子クラスターの評価について、その実施内容と取得したデータの傾向分析結果について紹介があった。主な意見は以下の通り。

- ・照射量の増加と共にクラスター中の Ni と Si が増加するのは、欧州の監視試験片の分析結果とも整合している。
- ・Si の転位への影響については、Cr 濃度により影響が変わるとの知見があるため、マトリックス損傷への影響を含めて検討が必要と考える。
- ・2013 年追補版策定時はクラスタ一体積率にのみ着目していたが、今回は体積率だけでなくクラスター直径や数密度に分けて分析した点が新しい。今後、脆化予測法見直しの際には、このような知見を活用していく。
- ・このようなアトムプローブデータについては、様々な人がアクセスできるよう今後公開することも考えてほしい。

(4) 軽水炉照射材料健全性評価研究 照射脆化予測法に係る研究の概要

JAEA が実施している脆化予測法に関する研究内容について紹介があった。主な意見は以下の通り。

- ・BNP 法は、ミクロ組織の情報も考慮するのは扱える入力変数の数の観点から困難であったり、例えば照射温度などデータ数に対してバリエーションが少ないデータは計算が集束しにくいといったことが、手法としての限界を感じている。
- ・今回紹介のあった BNP 法による各種パラメータの感度解析結果は、今後の脆化予測法の見直しに反映したほうがよい。

以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
平成 29 年度 第 3 回小委員会 議事概要

1. 日時:平成 30 年 1 月 17 日(水) 13:30~17:00

2. 場所:溶接会館 5 階 ABC 会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、浦木幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、阿部(東大)、永井(東北大)、橋本(北海道大)、福元(福井大)、西山、高見澤、塙(JAEA)、曾根田、野本、西田、橋本(電中研)、藤井(INSS)、西野(北海道電)、折田、神長(東電)、伊藤(中電)、秋山(四電)、吉岡(中国電)、山本(九電)、中川(原電)、蓮沼(電発)、平野、佐藤(IHI)、石崎(日立)、豊田、小畠(日立 GE)、高本(MHPS)、[森代理]羽田野、片山(東芝)、崎間、名越(MHI)、船田(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) 京都大学における照射脆化研究の紹介
- (2) JEAC4201 の見直しに当たって
- (3) 中性子照射脆化予測法のミクロ組織変化予測の見直し

5. 議事概要

(1) 京都大学における照射脆化研究の紹介

京都大学における照射脆化研究について Mn の照射影響に関する知見やミニシャルピー試験片を用いた微小試験技術を中心に紹介があった。主な意見は以下の通り。

- ・当該の研究ではアトムプローブ観察を実施していないが、九大で Fe-Mn の二元モデル合金について STEM-EDS により観察した結果、溶質原子クラスターの形成が認められたとの知見はある。ただし、転位ループのところに集積したものであり、あくまでも転位ループが主役と理解している。
- ・Mn 濃度が 1%と 1.5%で結果に少し違いが見られるので、当該研究の照射材を再度最新の WB-STEM 法で観察するなどして Mn 濃度依存性を明確にしたほうがよい。
- ・実用鋼では、Mn は炭化物中に存在するので、マトリックス中の Mn 濃度の範囲はバルク Mn 濃度の範囲よりも狭い可能性がある。
- ・Mn の照射影響は溶質原子クラスターとは照射脆化機構が異なるため、今後原子炉容器が高照射領域に達して顕在化することに備えて、Mn の照射脆化機構の照射量依存性の研究を今のうちから進めるべきである。

(2) JEAC4201 の見直しに当たって

現行の JEAC4201-2007[2013 年追補版]の脆化予測法の特徴を踏まえた改良の方針について説明があつた。主な意見は以下の通り。

- ・現行の脆化予測法では、アトムプローブで観察されたものは原子の種類は問わずに一律溶質原子クラスター、それ以外をマトリックス損傷と分類しており、電子顕微鏡の研究者がイメージするマトリックス損傷と、この式での定義が異なることが混乱の一因となっている。

- ・照射促進クラスターと照射誘起クラスターの硬化への寄与について、Mn のクラスターは 10 倍くらい硬化に効くにも関わらず原子の種類を考慮せずに一律同じ硬化係数とするのは違和感がある。
- ・この式では 3 つの照射欠陥を想定しているとあるが、Cu 濃度が固溶限以下($\leq 0.04\%$)の場合、照射促進クラスターができないことになるので結局 2 つだけとなる。TEM で照射欠陥がどこまで見えているかにもよるが、見えないものがあることを考えると、照射促進クラスターを除外していいのかわからない。
- ・遷移温度上昇量を $\angle T_{Sc}$ と $\angle T_{MD}$ の二乗和平方根とするとの考え方についても見直さなくてよいのか確認しておいたほうがよい。
- ・マトリックス損傷のモデルについて、今の時点で変更しないと言い切らずに、別のモデルの可能性も探ってみるべきと考える。

(3) 中性子照射脆化予測法のミクロ組織変化予測の見直し

- 脆化予測法の改定案のうち、ミクロ組織変化の予測式について説明があった。主な意見は以下の通り。
- ・予測式の係数が、最適化後も初期値から変化していないものがある。今後、見かけの最適解になっていないことの確認や係数の簡略化の検討が必要となる。
 - ・照射脆化メカニズムとの整合の観点から、例えばマトリックス Cu 濃度について、複数の異なる方法で独立に算出して両者が整合しているかを確認したほうがよい。
 - ・マトリックス損傷と(マトリックス損傷が核となる)照射誘起クラスターを分離しても、結局それをどう硬化に結びつけるかが重要。今後の見直しの課題になると思う。
 - ・アトムプローブデータを活用して Cu の挙動がよく表現できたとのことであるが、現行の照射脆化機構の理解に基づきトレンドカーブの精度を上げるよりも、考慮していない因子による別の照射脆化機構及びその実用鋼への影響の解明に注力すべきと思う。
 - ・(今回用いたアトムプローブデータは同一の機関が同一の手法で実施したものであることは理解しているが)アトムプローブ分析は分析者によって値が異なるのが実態のため、分析手法のスタンダードの確立についても取り組む必要がある。

以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
平成 29 年度 第 4 回小委員会 議事概要

1. 日時:平成 30 年 3 月 30 日(水) 13:30~16:00

2. 場所:溶接会館 5 階 ABC 会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、浦木幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、橋本(北海道大)、高見澤(JAEA)、曾根田、野本、西田、橋本(電中研)、藤井(INSS)、西野(北海道電)、神長(東電 HD)、伊藤(中電)、室(北陸電)、秋山、橋本(四電)、吉岡(中国電)、山本(九電)、蓮沼(電発)、平野、佐藤(IHI)、石崎(日立)、豊田(日立 GE)、森、片山(東芝 ESS)、崎間、名越(MHI)、船田、北條(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) 第 3 回 IET 小委員会資料に対するコメント及び回答
- (2) 平成 29 年度活動報告書(案)
- (3) その他

5. 議事概要

(1) 第 3 回 IET 小委員会資料に対するコメント及び回答

第 3 回 IET 小委員会で紹介のあった JEAC4201 の見直し方針及び照射脆化予測法のミクロ組織変化予測の見直しに対する委員コメント及び回答の紹介が行なわれた。主な意見は以下の通り。

・回答に「一定の説明性」とあるが、コメント者は、ミクロ組織変化の式が照射脆化メカニズムを踏まえたものとなっているかという趣旨でコメントされたのであり、回答はコメント者の意図する説明性とはレベルが異なるのは?

→現段階で必ずしもメカニズムの観点が反映されていないことについてはコメント者にも理解いただいている。その前提の上で、今回反映されていない点及び今後明らかにすべき課題を明確にするためにコメントしたことであった。脆化予測式において最も重要なのは遷移温度上昇量を精度よく予測できること、メカニズムについては研究を進めて今後脆化予測式に反映すべき知見が出てきた段階で反映を検討するということである。コメント者とも認識は一致している。

・メカニズムと脆化予測式は別という認識なのか?

→予測式では、メカニズムを念頭に置くものの定式化する段階である仮定のもと割り切って簡略化している部分があり、そういう意味でメカニズムとは別となる。コメントは、今の式はアトムプローブ測定で得られたデータを基本にしているが、照射欠陥の種類ごとにモデル化する方法もあり、そういう方法のほうが将来的な発展性はあるのではないかという趣旨であったが、メカニズムの観点で課題と考えていることはコメント者とそう違わないと考えている。

・Cu については、濃度が 0.2wt.%以上でないとマトリックス損傷への影響は出てこない。国内の供用中プラントの Cu 濃度の最大値が 0.16wt.%だというのであればマトリックス損傷への Cu の影響はそれほど重視する

必要はないと感じる。低照射領域で影響が飽和する Cu よりも高照射領域での影響が大きい化学成分に着目すべきと考える。

- ・コメント回答に「一定の説明性を有しております」とあるが、今回の式はフィッティングであわせているだけであり、メカニズムとの整合性についてはむしろ説明性は不要である。
- ・直径 1nm 以下のクラスターが寄与しているという議論もあるので、「20 個以下のものはクラスターとして抽出しない」という処理は不適切と考える。
- ・コア原子がランダムに分布した状態で偶然クラスターとして抽出される個数が統計的におおむね 20 個程度である。この方法で抽出されたクラスターの体積率の平方根と遷移温度上昇量に線形の相関があることが確認されており、直径 1nm 以下のクラスターの全体の体積率への寄与はほとんど無視できると考えている。
- ・10 個にすると非現実的に多数のクラスターを抽出してしまい適切な結果を得られないことを経験しており、そのような観点から多くの研究機関で 20 個程度に設定しているのが実態。20 個の根拠については装置の分解能と原子分布の統計的な観点から決まっていると理解している。
- ・クラスターの組成の影響については、JNES の PRE プロジェクトでいろいろな組成の鋼材を照射しており、その中で Cu を含むクラスターや含まないクラスターをあわせて分析した結果、体積率の平方根と遷移温度上昇量に線形の相関があるとの知見を得ており、それに基づき予測式を構築している。クラスター中の Cu は、0~10at.%程度の範囲で連続的に変化しており、クラスター中の元素の組成にはあまり差がない。実機鋼材で組成によらず線形の相関が見られるのはそれが原因と考えている。
- ・Cu を含む鋼材でも、Cu がクラスターに集積しつくした後で新たに Ni-Mn-Si クラスターができるることは考えられるが、それは極めて照射量の高い領域で始めて顕在化する事象と考えている。
- ・クラスターの組成は構造因子的には影響がなく、体積のほうが影響が大きいと考えていると理解した。

(2) 平成 29 年度活動報告書(案)

平成 29 年度活動報告書(案)について説明があった。今後、今回的小委員会の議論内容を反映したものを見直し、コメントを反映した上で次回小委員会で確定させること、扱いについては委員会限りとする旨説明があった。

(3) その他

平成 29 年度最終の小委員会となることから、1 年間の活動の振り返りが行なわれた。

- ・今年度の活動報告書については、中間段階であることから委員会限りとしたが、本小委員会の役割を踏まえると委員会の最終成果を公開する必要性は認識しており、別途どういうものを公開していくか検討する。
- ・今年度の議論で、ミクロ組織の予測についてはよく検討していると感じたが、重要なのは最終目的である原子炉容器の照射脆化を予測し、健全性をどう確保していくかである。その観点では、トレンドカーブの精度向上にのみ注力するのは有益でないと感じている。
- ・今年度の議論で課題や方針が見えてきたと感じた。結果を電気協会や産業界に提言していくためには、実機に適用するという観点でもう一段上の議論が必要であり、2 年目が正念場を感じている。ミクロ組織の変化は機械特性変化の起源となることから、ここをしっかりと議論することが本小委員会の役割と理解している。

以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
平成 30 年度 第 1 回(通算 第 5 回)小委員会 議事概要

1. 日時:平成 30 年 11 月 13 日(火) 13:30~16:45

2. 場所:溶接会館 5 階 ABC 会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、高田幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、阿部(東大)、永井(東北大)、橋本(北海道大)、福元(福井大)、西山、高見澤、塙、河(JAEA)、曾根田、土肥、野本、西田、橋本、熊谷、小林、Kirk(電中研)、藤井(INSS)、[西野代理]沼田(北海道電)、渡邊(東北電)、折田、神長(東電)、伊藤(中電)、橋本(四電)、山本(九電)、蓮沼(電発)、平野(IHI)、宮田(日立 GE)、高本(MHPS)、森、片山(東芝)、崎間、名越(MHI)、船田、北條、佐々木(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) ニューラルネットワークを用いた圧力容器鋼の中性子照射脆化データの試解析
- (2) 中性子照射脆化予測法の遷移温度移行量予測の見直し検討状況
- (3) ベイズ統計による照射脆化データの解析(進捗報告)

5. 議事概要

(1) ニューラルネットワークを用いた圧力容器鋼の中性子照射脆化データの試解析

電中研が実施しているニューラルネットワークによる中性子照射脆化データの試解析結果について紹介があった。主な議論は以下の通り。

- ・Mn の影響については、ニューラルネットワークによる分析結果を見る限りにおいては、パラメータとして含めることで残差の標準偏差が他よりも減少するような傾向は見られず明確な影響はないと考える。
- ・パラメータを一つ一つ加えていく方法はそれが互いに独立であれば有効な方法だが、例えば Cu と P のように互いに相関がある場合に、何が影響を与えているか判断するのは適切でないと考える。
- ・初期降伏応力をパラメータに含めると Si の影響があるとの傾向は見えており、これは学習の深さを変えても同じ傾向なので、Si の影響はあると判断した。この結果は、JAEA の研究結果とも整合している。
- ・今回の検討では、鋼種はそれぞれデジタル値で分類しているだけだが、この点はまだ改善の余地がある。
- ・国内データ+国外データのケースを見るとばらつきの大きい国外データの傾向に支配される結果となっている。国内データと国外データで性質は異なるが、国内データは値の幅が狭いということもあり、より一般的な知見や国外データのみに存在する傾向が抽出できないかという観点で国外データでも分析した。

(2) 中性子照射脆化予測法の遷移温度移行量予測の見直し検討状況

次期照射脆化予測法のうち、遷移温度移行量予測式の検討状況について説明があった。主な議論は以下の通り。

- ・ミクロ組織変化予測式の係数をアトムプローブの測定データで最適化して固定せずに、遷移温度移行量予測式の係数と併せて最適化したのは、現状アトムプローブの測定データは比較的照射量の高いものが中心

であり、それだけで最適化すると適切な結果が得られないためである。

- ・アトムプローブの測定データを用いて最適化された係数は、ミクロ組織変化予測式の係数の初期値を決めたことに相当すると捉えることができる。
- ・目的関数の個々の指標に乘じる係数は、残差を最も小さくする観点から試行錯誤により組み合わせを決定した。係数の設定について、以前統計解析の専門家にも相談したことはあるが、設定根拠を合理的に説明するのは困難と考えている。
- ・メカニズムの観点からは単に残差を小さくすればよいというものではない。むしろ材料が本来持っているばらつきを踏まえれば一定程度のばらつきは本質的に存在すると理解すべきである。
- ・目的関数に ΔT_{41J} 以外の指標も含めた理由は、 ΔT_{41J} が最も重要ではあるが、一方で ΔT_{41J} はミクロ組織変化と相関があることもわかっているので、アトムプローブの測定データに対しても最大限の相関を確保するためである。
- ・一旦アトムプローブデータに対して最適化した係数を変えないのであれば、目的関数に ΔT_{41J} 以外の指標は不要だが、今回の最適化ではミクロ組織変化予測式も含めて全ての係数を再度最適化しているため、目的関数にミクロ組織に関する指標も設けないとミクロ組織に対して合わせることはできない。
- ・ σ_{NL} をヒートごとで決めるというのは、 Mc 補正を別の形で入れているのと同じことと理解されるが、(第 1 回 IET 小委員会で言及のあった) Mc 補正に関する懸念と同じ懸念がある。
- ・短距離相互作用は 2 乗和の平方根で、長距離相互作用は線形和で定式化する根拠は、教科書ベースの古典的な理論に従つたものである。
- ・ σ_L と σ_{NL} は初期のミクロ組織に応じて定まると考えられるが、現状ではミクロ組織分析(転位の量や結晶粒径など)に基づく評価結果を予測式に使えるようなレベルまで積み上げて、短距離相互作用と長距離相互作用に切り分けて評価できるだけの知見は得られていないので、初期降伏応力がその 2 つに分離できるとの仮定をおいて定式化している。
- ・ σ_L と σ_{NL} に分けて最適化した結果(初期組織の影響を考慮した結果)を見ると、残差の標準偏差は減少しており、 ΔT_{41J} に初期組織がある程度寄与していると考えられる。
- ・目的関数に含まれる Mc は、なるべく Mc が大きくならないよう係数を最適化する観点で設定されているものであり、JEAC4201 の脆化予測で用いる監視試験データにより計算される Mc とは別である。

(3) ベイズ統計による照射脆化データの解析(進捗報告)

第 2 回 IET 小委員会で紹介のあった JAEA が進めているベイズ統計による照射脆化データの解析について、その後の進捗状況について紹介があった。主な議論は以下の通り。

- ・ RT_{NDT} 初期値を加えた場合、 RT_{NDT} 初期値自体も Ni などの他のパラメータと相関があることから、例えば全データで見た場合は Cu と Ni だけで十分相関がとれてしまい、明示的に影響があらわれない結果となつたと考えられる。
- ・JAEA による研究成果は、新しい予測法に取り入れられるべき因子を統計的に確認していくことと、その先の話として、評価する上でどういったマージンが適切か統計的に検討していくことに反映される。

以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
平成 30 年度 第 2 回(通算 第 6 回)小委員会 議事概要

1. 日時:平成 31 年 3 月 26 日(火) 13:30~15:45

2. 場所:溶接会館 2 階ホール

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、高田幹事、大庭幹事(関電)、木村(京大)、阿部(東大)、永井(東北大)、橋本(北海道大)、福元(福井大)、西山、高見澤、端(JAEA)、曾根田、土肥、野本、西田、橋本(電中研)、藤井(INSS)、西野(北海道電)、渡邊(東北電)、折田、神長(東電)、伊藤(中電)、[吉岡代理]兼折(中国電)、山本(九電)、平野、佐藤(IHI)、小畠(日立 GE)、石崎(日立)、高本(MHPS)、森、片山(東芝 ESS)、崎間、名越(MHI)、船田、北條、佐々木(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) 第 5 回資料の論点及び追加意見に対する回答
- (2) 遷移温度移行量予測における係数最適化の追加検討状況
- (3) その他

5. 議事概要

(1) 第 5 回資料の論点及び追加意見に対する回答

第 5 回 IET 小委員会で議論した遷移温度移行量予測の見直し検討状況に対する論点及び追加意見の紹介、及びそれらに対する回答が行なわれた。主な議論は以下の通り。

- ・照射硬化量の評価において各因子の寄与を 2 乗和平方根で表わすことはあるが、鉄鋼材料の降伏応力を推定する際の各因子(結晶粒径、析出物、転位等)の寄与は通常単純和で表わすもので、 σ_L と σ_{NL} に分離した上で 2 乗和平方根で表わすようなことはない。また、教科書では熱的な成分と非熱的な成分に分けて、長距離相互作用は非熱的とし、短距離相互作用は熱的として扱っている。そのような取り扱いについても認識した上で検討を進めてもらいたい。
- ・第 5 回 IET 小委員会で示した非線形形式は欠陥が転位に作用する際の短距離相互作用は 2 乗和の平方根で、長距離相互作用は線形和で表されるという古典的な理論に従つたものであり、これらを実験的に決めるのが難しいことは認識している。照射欠陥との重畳については、 σ_L と σ_{NL} は単純和とし、 σ_{NL} に寄与する強化因子の重畳(σ_{NL} の中身)が二乗和平方根で表現されるとの考え方を採用している。

(2) 遷移温度移行量予測における係数最適化の追加検討状況

第 5 回 IET 小委員会での議論結果を踏まえて係数最適化について追加検討を行なった結果について紹介があった。主な議論は以下の通り。

- ・今回の追加検討は、係数 A~E の値の違いにより、どの指標を重視しているかまでは示せても、各項の相関がどうなっているかまでは明らかにできていない印象である。
- ・ ΔT_{41J} と $\sqrt{V_f}$ には相関があるので独立とは言えないが、 ΔT_{41J} のみを目的関数として最適化してもミクロ組織

の予測精度は落ちるので、 ΔT_{41J} の最適化がミクロ組織の最適化につながるわけではないと考えている。このため、現状のデータベースの範囲では、適切な式を得るために ΔT_{41J} とミクロ組織の両方の指標を目的関数とする必要があると判断している。

- ・結果的によくなつたという説明だけでなく、係数 A～E を設定した根拠についてミクロ組織との関連で説明する必要があると感じる。それを説明できないと照射脆化メカニズムの理解が進んだと言えないのではないか。
- ・一般的には材料科学的にはこうあるべきという考え方を示した上で適用したらどうなるかという説明となるが、今回はなるべく合うような比率を探した結果についての説明であり、その意味の説明にはなっていない。
- ・今回の追加検討では、少なくとも現時点で使えそうな判断基準は提示しているし、統計的な観点も考慮されていると考えるが、指摘のあった点が学術的な議論として残るのは事実である。
- ・照射脆化メカニズムを全て明らかにしないと予測式を作れないわけではない。予測式としては、照射脆化メカニズムの観点で最適なものにする必要はなく、導出プロセスに客觀性があり的外れなロジックでないものであって、適切な管理ができるものであることが最も重要である。
- ・重みをつけた結果、それが確からしく予測式として適切だということになれば、それが照射脆化メカニズムの観点でどういう意味なのか、今後示していくのが我々材料の専門家の役割ということではないか。
- ・ σ_L と σ_{NL} について、照射前の材料科学的な状態の違いにより照射硬化の挙動が異なることは理解できるが、個別のフィッティングで炉ごと・ヒートごとに値を変えるのは反対である。 Mc 補正と似ているとコメントしたが、ある意味 Mc 補正のほうがそこで初期値のばらつきを考慮するという目的がはっきりしている。一方、 σ_L と σ_{NL} の意味合いは材料科学的には全くわかつていない。
- ・最適化の結果、初期降伏応力のうち一定割合は σ_{NL} に区分されることはわかっている。また、 σ_L (間接的に σ_{NL} に相当)が、材料のどのパラメータと相関があるかということは確認している。
- ・Wilford らの知見から、初期組織が照射硬化量に影響することはわかるが、VSR(Variable Stress Relief)により焼鈍温度を変えているので、厳密な意味では炭化物の状態が変わっている可能性がある。圧力容器鋼で遷移温度上昇量が照射硬化量に比例することはよく知られているが、この材料についても同様の比例関係が認められるか確認しておく必要があると考える。
- ・次回、次期予測式を線形式と非線形式のどちらで進めるか提案してもらい、それに対して各専門家が学術的な観点から意見を明確にすることとしたい。

(3) その他

平成 30 年度の最終の小委員会となることから、1 年間の活動の振り返りが行なわれた。また、活動期間は、半年間延長し、2019 年度上期末までとすることとなった。

- ・委員会では、良好な結果が得られたケースのみ提示されたため、材料科学的にどのような検討を経てそのようなケースに至ったのかが委員には見えづらいと感じた。
- ・残差の標準偏差 σ が小さくなることがより進歩した予測式であるとの考えは断ち切っていただきたい。材料が持つ真のばらつきが十分に理解されていない中で、 σ のみを判断指標とすることは将来の照射脆化メカニズムの理解の進捗や予測式の改定に対して悪い影響を与えると考える。
- ・ Mc 補正については京大の森下先生が 1 年ほど前の原子力学会で発表した内容が参考になる。 Mc 補正の意味合いがきちんと説明できるのであれば、それを引き続き採用するオプションもあると思うので、発表された内容を参考にして Mc 補正の物理的な意味を明らかにされることを期待したい。以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
令和元年度 第1回(通算 第7回)小委員会 議事概要

1. 日時:令和元年 7月 16日(火) 13:30~17:10

2. 場所:溶接会館 5階 ABC 会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、高田幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、阿部(東大)、永井(東北大)、橋本(北海道大)、福元(福井大)、西山,端(JAEA)、佐伯,野本,西田,橋本(電中研)、藤井(INSS)、西野(北海道電)、折田,神長(東電)、牧川(北陸電)、伊藤(中電)、兼折(中国電)、橋本(四電)、山本(九電)、蓮沼(電源開発)、平野,佐藤(IHI)、小畠(日立 GE)、石崎(日立)、高本(MHPS)、森,片山(東芝 ESS)、崎間,名越(MHI)、船田,北條,佐々木(NRA)、佐々木(事務局)

4. 議題

- (1) 関連温度移行量評価に関する研究—中性子照射サンプルの微細組織分析—
- (2) 中性子照射脆化予測式の基本モデル式の改定案、IET 小委員会での議論結果及び今後の研究課題
- (3) IET 小委員会最終取りまとめに向けた今後の活動

5. 議事概要

(1) 関連温度移行量評価に関する研究—中性子照射サンプルの微細組織分析—

JAEA が実施している中性子照射サンプルの微細組織分析状況について紹介があった。主な議論は以下の通り。

- ・JAEA では IVAS のクラスター抽出アルゴリズムを用いて $\sqrt{V_f}$ を求めているが、電中研のアルゴリズムよりも大きな値となる。これはクラスター表面の Fe イオンを取り除くアルゴリズムの違いの影響でクラスターサイズがより大きくなつたためと考えている。
- ・IVAS と電中研の $\sqrt{V_f}$ を比較すると大体 2割程度の差となっていることから、概ね 1対 1 の相関と見てよいと考える。仮にアルゴリズムの違いがあったとしても $\sqrt{V_f}$ の項に乗じられる係数が最適化により変化して調整されるので、実質的な影響はない。
- ・厳密に言えば、アルゴリズムの違いによりどこまでをクラスターとして扱うかが若干変わり得るので、両者で線形の相関が保証されているものではない。ただし、特に低脆化量の領域では絶対値が小さい中で相対的に大きなばらつきとなっており、実質的には寄与しないと考えられる。
- ・クラスター中で Cu と Si が互いに相殺するような傾向がみられたが、今回示した結果のみで Si の効果をどのように考慮すべきかまで提言することはできない。
- ・クラスター中で Cu と Si が反発的な挙動になるという傾向については、電中研でも同様の知見を得ているが、低 Cu 材でバルク Si の影響を受けるという知見は電中研では得ていない。
- ・クラスター中で Si が外側に偏析していることと、Cu と Si に負の相関があることの関係はまだ解明できていない。当初は Cu が減るとそれを補うように Si が偏析すると予想したが、そういう傾向は確認できなかった。
- ・P のクラスター形成への影響については、P の含有量が少ないと、Cu と P の含有量には相関があつて Cu

の傾向に埋もれてしまい P 単独の影響は確認できなかった。

(2) 中性子照射脆化予測式の改定案、IET 小委員会での議論結果及び今後の研究課題

第 6 回 IET 小委員会の議論結果を踏まえた脆化予測式改定案の説明の後、IET 小委員会におけるこれまでの議論の振り返り、それを踏まえた今後の研究課題について説明があった。主な議論は以下の通り。

- ・提案式ではクラスター平均体積が(A+Bt)の式で表されているが、この式は現在のデータベースの範囲(最大 10^{20}n/cm^2 程度の照射量)での線形の傾向を踏まえたものである。提案式は時間が経つほどクラスタ一体積が増え続ける式になっているが、現象論的には飽和傾向となるような定式化のほうが適切と思われる。
- ・クラスタ一体積率の式で係数 1.1 が乗じられているのは、体積率を計算する際に個々のクラスタ一体積を合計して全測定体積で除す方法と、平均クラスタ一体積に数密度を乗じる方法の 2 通りがあり、後者で算出される脆化予測法の計算結果を前者に補正するための係数である。理論的には両者は同じ値となることやクラスタ一体積率はアルゴリズムにより値が変わりうるのでここだけ厳密に 1.1 を乗じるのは違和感がある。
- ・オフセット補正については、新しい監視試験データにより値を見直すか否かといった運用を含めて今後電気協会で検討されることになるが、IET 小委員会からも何らかの技術的な推奨事項が示されるとありがたい。
- ・新たなデータを加えることでオフセット補正值が変わるのは、高々数点のデータに基づいて推定される真のトレンドに不確かさがあることを示している。オフセット補正を行なうにしても、残差の標準偏差だけをマージンとするのは不十分で、それに真のトレンドの推定誤差も加える必要がある。
- ・Mc と Oa の違いは、Oa は初期値も含めた残差の平均値であるのに対し、JEAC4201 の Mc は初期値を含まない残差の平均値である。
- ・提案式で係数最適化の際に個々のデータに重みづけをしていないことについて、現行式では高照射量のデータが不十分であることを重み付けの理由としており、方針が一貫していない印象を受けるため、例えば現行式と同じ方法で重み付けをした結果を示すなど、方針を変えた理由の説明が必要である。
- ・目的関数にミクロ組織に関する指標も含めないと良好に最適化できないのは、ミクロ組織変化に基づく ΔT_{41J} の予測式(脆化予測式改定案)が未だ不十分であることを示しているのではないか。
- ・初期状態及び照射条件がこれだけ多様な鋼材に対して両立は難しいというのは、この検討の大前提である。提案式は今の知見で見えているものだけで構築しており、考慮されていない冶金学的なファクターはたくさんある。 ΔT_{41J} だけでミクロ組織が合わせられないであれば不十分というのは非現実的な理想論と思う。

(3) IET 小委員会最終取りまとめに向けた今後の活動

IET 小委員会の最終報告書の取りまとめに向けて、脆化予測式改定案に対する各委員のご意見をいただくために送付する質問状案について説明があった。主な議論は以下の通り。

- ・質問状と併せて本日の議論を踏まえて内容を見直した脆化予測式改定案の資料も準備いただきたい。
- ・委員の専門に応じて着目する観点が異なり、それぞれに優先すべきと考える重要な事項は異なると思われる所以、回答は自由記述となっているほうがあがたい。
- ・それぞれの視点の違いによりいろいろな意見が出ると思うのでなかなか統一した見解にまとめるのは難しく、最終報告書の中では委員の意見を併記する形にならざるを得ないと思う。

以上

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会
「原子炉圧力容器の中性子照射脆化予測法検討小委員会」
令和元年度 第2回(通算 第8回)小委員会 議事概要

1. 日時:令和2年1月7日(火) 13:30~17:20

2. 場所:溶接会館5階ABC会議室

3. 出席者(順不同、敬称略):

鈴木主査(長岡技科大)、福谷副主査(INSS)、高田幹事、大厩幹事(関電)、廣田幹事(MHI)、木村(京大)、永井(東北大)、福元(福井大)、西山、高見澤(JAEA)、佐伯、野本、西田、橋本(電中研)、藤井(INSS)、西野(北海道電)、渡辺(東北電)、折田、神長(東電)、牧川(北陸電)、伊藤(中電)、[吉岡代理]加藤(中国電)、橋本(四電)、山本(九電)、浦邊(原電)、蓮沼(電源開発)、佐藤(IHI)、小畠(日立 GE)、石崎(日立)、高本(MHPS)、森、片山(東芝 ESS)、崎間(MHI)、船田、北條、佐々木(NRA)、佐々木(事務局)

4. 配布資料

- (1) 中性子照射脆化予測式改定案への意見集約結果及びそれに対する回答
- (2) 過去のIET小委員会でのコメントの回答: ΔT_{SC} と ΔT_{MD} を線形和とした結果及び現行予測法と同じ方針でデータに重み付けした結果
- (3) 中性子照射脆化予測式改定案における予測値の補正及びマージン設定の考え方
- (4) 中性子照射脆化予測式改定案における係数最適化の第3者検証の取り組み
- (5) IET小委員会最終報告書(案)の進捗状況

5. 議事概要

(1) 中性子照射脆化予測式改定案への意見集約結果及びそれに対する回答

第7回IET小委員会後に全委員に送付した質問状へ寄せられた意見を集約した結果の紹介及び個々の意見に対する現時点の回答の説明があった。回答において今後の研究課題とした内容については、検討の難易度を踏まえて、①短期、②中期、③長期に区分している。主な議論は以下の通り。

[質問No.2に対する回答]

- ・意見欄に記載した「微分方程式とならない」という表現について、ここでは式を構築していくまでの手法としての微分方程式との趣旨という理解のもとで意見を記載したことを補足する。
→当該の表現は「近似式への定式化」に見直し済である。
- ・質問状は個々の考え方の正否を二択で問う形式になっているが、むしろ予測式を策定した目的とそれを達成するためにどのような考え方を採用したかが重要と考える。照射脆化メカニズムが完全に理解されているわけではないので、現在の知見に照らして妥当かどうかという考え方しかできない。予測式としては、現状知見に照らして概ね妥当と思われる考え方を採用されていること、意図的な合わせこみをしなくとも概ね予測できていることが重要と考える。

[質問No.3に対する回答]

- ・マトリックス損傷の体積密度を求める際には、欠陥の大きさによって強度への影響が異なるため大きさを考慮することが望ましいが、現在の分析技術では現実的ではないため、今後の研究課題である。

(2) 過去の IET 小委員会でのコメントの回答: ΔT_{SC} と ΔT_{MD} を線形和とした結果及び現行予測法と同じ方針でデータに重み付けした結果

過去の IET 委員会でコメントのあった ΔT_{SC} と ΔT_{MD} を線形和とした結果及び現行予測法と同じ方針でデータに重み付けした結果の 2 点について説明があった。それに対する主な議論は以下の通り。

[ΔT_{SC} と ΔT_{MD} を線形和とした結果]

- ・今回の予測式ではマトリックス損傷をアトムプローブで測定できないものの総称と定義しており、実態として多くの欠陥集合体に溶質原子が付着していることを考えると、今回の結果は当たり前ではあるが、この定義に基づくマトリックス損傷がほとんど無視できるほど小さいから線形和か 2 乗和平方根で差が出なかつたということであって、一般論として線形和か 2 乗和平方根かで差が出ないというわけではない点に注意が必要である。
- ・電子顕微鏡を用いている研究者は、主に欠陥集合体を観察しているので、本当に溶質原子クラスターが欠陥集合体と同程度に硬化に寄与するのかという疑問から、その一つとして線形和と 2 乗和平方根の違いに着目されたと考えられる。将来的には溶質原子クラスターと欠陥集合体の硬化への寄与を解明するのと併せて線形和と 2 乗和平方根のどちらが適切かという点も検討されることが望ましい。

[現行予測法と同じ方針でデータに重み付けした結果]

- ・4 つのケース(検討条件 1,2、提案式及び 2013 追補)の結果を比較しているが、当初の 2007 年版の式による予測結果も示して、2007 年版から 2013 追補への変化と併せて比較すれば、提案式では重みをつけてもあまり予測結果が変化しない傾向がより明瞭になると考える。
- ・提案式ではミクロ組織データの再現性も重視しているが、もともとミクロ組織データは高 EFPY のものが中心で結果として重みがついた状態となっていたため、2013 追補のように重みづけしてもあまり予測結果が変化しなかったという点が明確になるように説明したほうがよい。

(3) 中性子照射脆化予測式改定案における予測値の補正及びマージン設定の考え方

第 7 回 IET 小委員会の議論を踏まえて、予測値の補正及びマージン設定の考え方について現在の検討状況の説明があった。主な議論は以下の通り。

- ・監視試験データは高々 4,5 点しかないので、それに基づき鋼材ごとの初期値を推定するのであればその誤差を考慮する必要がある。それぞれのデータの測定誤差を積み上げれば推定誤差を評価できるのではないか。
- ・試験は同じ機関が同じ規格に従って実施したものであり、鋼材ごとに試験誤差が大きく異なることはない。また、国内鋼材では化学組成のばらつきもそれほど差がないと考えられ、照射量についてもドシメータによる測定結果をベースとしており概ね $\pm 10\%$ の範囲にあるものである。
- ・関連温度移行量の評価値の計算方法が、 $[\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値} + Mc] + Mr$ と記載されているが、これは当該の鋼材の評価に際して、 ΔRT_{NDT} 計算値 + Mc を真の値と見なすことを意図した表記と認識している。上記の議論は、その真の値を求める上で Mc を足すだけで十分なのかという指摘だと思う。
- ・ Mc 補正が必要となる理由は全て理解されているわけではないが、そういったわからない部分も含めて予測結果の保守性を担保するのは、工学的に決められている Mr (マージン)の役割と考える。
- ・脆化予測の結果は必ず当該の材料の監視試験結果を包絡させるのが評価の基本的な考え方と理解している。まず監視試験結果のトレンドの中心を通るように Mc 補正により平行移動させた上で、ばらつきを Mr で考慮するという 2 段階のマージンで安全裕度を確保する考え方と思う。問題は Mc 値がプラスとなる場合に、予測結果を都合のよいように操作していると受け取られかねないことではないか。

- ・安易な操作と受け取られないよう説明を工夫する必要があることと、技術的には統計学に基づいた処理であることをきちんと説明する必要があると考える。単なるずれなのか、新機軸なのかを明らかにするために、複数の機関でミクロ組織の調査を行うなどの取り組みが必要と思う。
- ・予測式の性能評価の際、 M_C 補正後の予測残差の標準偏差を改定前後で比較して前よりも改善したと説明されることが多いが、 M_C 補正後の予測残差は真の値のばらつきを過小評価していると考える。
- ・今回の改定では、マージン設定に際して M_C 補正後の予測残差の標準偏差だけを考慮するのではなく、化学成分やシャルピーのばらつきも考慮して設定する方針である。
- ・予測式を策定した監視試験データのデータベース自体にそういったばらつきも含まれてはいるが、マージンを設定する際に別途化学成分やシャルピーのばらつきを考慮するのは一案と思う。
- ・監視試験データで取得された照射量の範囲で、内挿の領域で予測式を運用するということであれば M_C 補正という考え方には一定の合理性はあると考える。
- ・ M_C 補正については改めての意見募集は不要とする。最終報告書に、本日いただいたご意見を含め議論内容を適切に記載することで対応したい。

(4) 中性子照射脆化予測式改定案における係数最適化の第 3 者検証の取り組み

活動項目(3)「脆化予測法改定案の係数最適化におけるプロセスの適切性の議論」の一環として、第 3 者が異なる手法により係数の最適化を行い、最適化結果をクロスチェックする取り組みの紹介があった。

(5) IET 小委員会最終報告書(案)の進捗状況

IET 小委員会の最終報告書(案)の進捗状況について説明があった。本報告書については、今後第 8 回小委員会の議論内容を反映したものを後日委員にメールで送付し、コメントを反映した上で、溶接協会のホームページに掲載予定である旨説明があった。

(6) その他

当初計画していた IET 小委員会の活動項目について概ね完了し、一部対応が必要な事項については後日メール送付にて対応する旨、幹事より報告があり、第 8 回小委員会を最終の委員会とすることが同意された。最後に、主査、幹事より過去 3 年間に渡る IET 小委員会の活動への委員各位の協力に対し謝意が述べられた。

以上



中性子照射脆化予測式の改定案について (公開版)

(一財)電力中央研究所

本資料は第8回IET小委員会資料IET-19-2-3
から非公開の内容を除いた「公開版」である

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

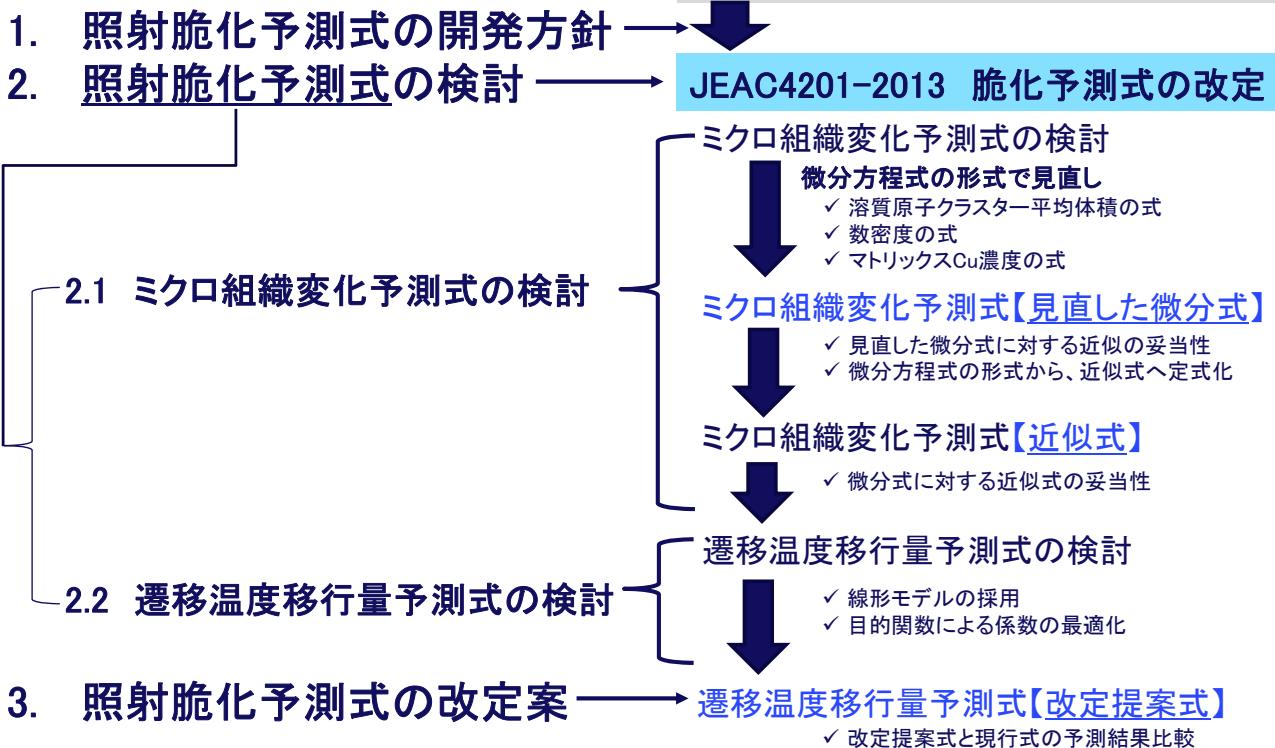
目次



1. 照射脆化予測式の開発方針
2. 照射脆化予測式の検討
 - 2.1 ミクロ組織変化予測式の検討
 - 2.2 遷移温度移行量予測式の検討
3. 照射脆化予測式の改定案
4. まとめ

APPENDIX A ミクロ組織変化予測式
(改定提案式(近似式)の微分方程式からの導出)

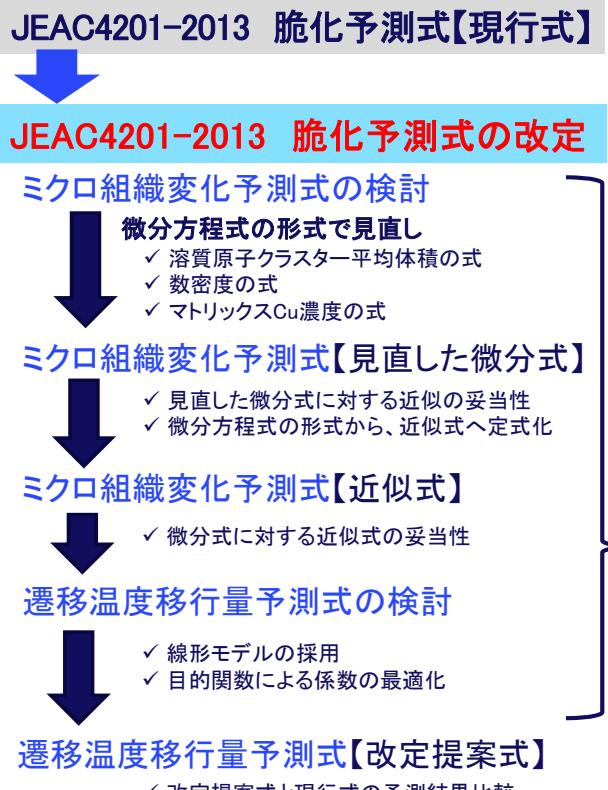
APPENDIX B 転位運動の障害物モデル
(線形モデル/非線形モデルについて)



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

3

1. 照射脆化予測式の開発方針



■ JEAC4201-2013以降の状況

- ✓ JEAC4201-2013の開発以降、新たな照射脆化要因は認められていない
- ✓ 国内照射材を対象としたアトムプローブ(APT)データが蓄積され、溶質原子クラスター(SC)形成をより定量的に評価できるようになってきた

■ 開発方針

ミクロ組織変化予測→遷移温度移行量予測の枠組みは変えず、それぞれの式を改良し、改定提案式を構築する

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

4

1. 照射脆化予測式の開発方針

JEAC4201-2013 脆化予測式【現行式】

JEAC4201-2013 脆化予測式の改定

① ミクロ組織変化予測式の検討

- 微分方程式の形式で見直し
 - 溶質原子クラスター平均体積の式
 - 数密度の式
 - マトリックスCu濃度の式

① ミクロ組織変化予測式【見直した微分式】

- 見直した微分式に対する近似の妥当性
- 微分方程式の形式から、近似式へ定式化

① ミクロ組織変化予測式【近似式】

- 微分式に対する近似式の妥当性

② 遷移温度移行量予測式の検討

- 線形モデルの採用
- 目的関数による係数の最適化

② 遷移温度移行量予測式【改定提案式】

- 改定提案式と現行式の予測結果比較

■ 開発方針

ミクロ組織変化予測→遷移温度移行量予測の枠組みは変えずに式を改良

① ミクロ組織変化予測

(現行式⇒式の見直し⇒近似式へ)

- 蓄積されたAPTデータを用いて、溶質原子クラスター形成の傾向を再現する相関式とする
- 残差分析を踏まえてマトリックス損傷(MD)に対する化学組成の影響等を見直す
- 微分方程式形式を近似式に定式化する

② 遷移温度移行量予測

- APTで測定される溶質原子クラスター体積率の平方根と遷移温度移行量の間に直線の相関があることを再現する
- 予測式は線形モデルとする(初期降伏応力を考慮しない)

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

初期降伏応力の考慮の要否(Appendix B参照)

- 最適化に用いるデータへ重みづけはしない

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

5

1. 照射脆化予測式の開発方針

ミクロ組織変化予測→遷移温度移行量予測の枠組みは変えずに、それぞれの式を改良し、改定提案式を構築する

脆化予測式の改定

① ミクロ組織変化予測式の検討

- 微分方程式の形式で見直し
 - 溶質原子クラスター平均体積の式
 - 数密度の式
 - マトリックスCu濃度の式

② ミクロ組織変化予測式【見直した微分式】

- 見直した微分式に対する近似の妥当性
- 微分方程式の形式から、近似式へ定式化

③ ミクロ組織変化予測式【近似式】

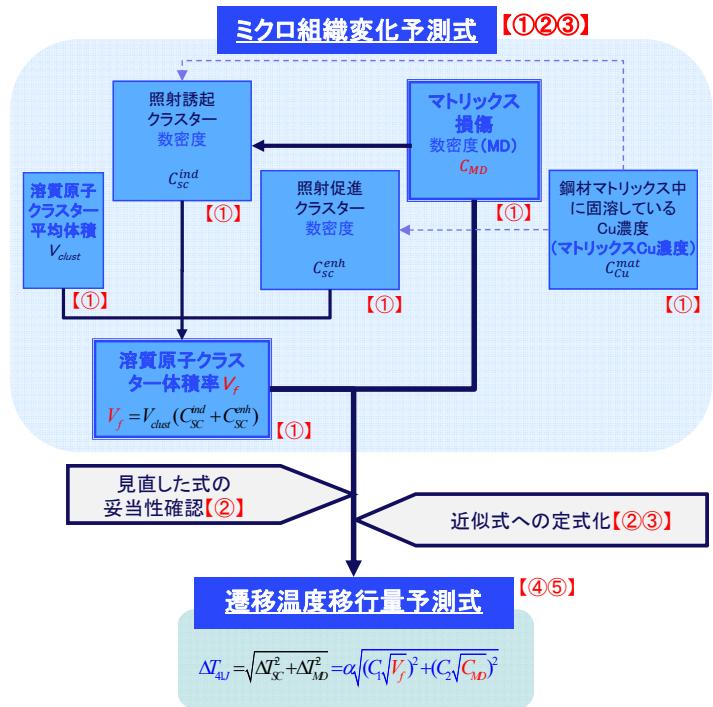
- 微分式に対する近似式の妥当性

④ 遷移温度移行量予測式の検討

- 線形モデルの採用
- 目的関数による係数の最適化

⑤ 遷移温度移行量予測式【改定提案式】

- 改定提案式と現行式の予測結果比較



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

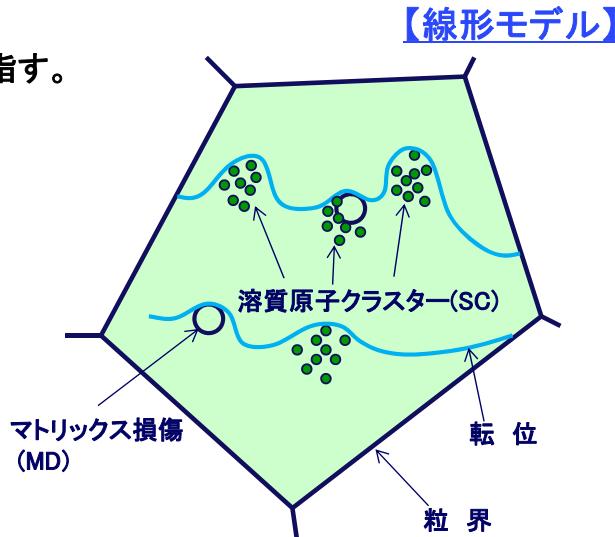
6

1. 照射脆化予測式の開発方針

用語の説明

■ 溶質原子クラスター

- APTで測定される溶質原子クラスターを指す。
これを単に「溶質原子クラスター」と呼ぶ
- 2種類の溶質原子クラスターを考える
 - ✓ 照射促進クラスター(照射促進クラスターの式)
中性子照射により形成が促進される均一核生成による溶質原子クラスター
 - ✓ 照射誘起クラスター(照射誘起クラスターの式)
中性子照射により形成される「マトリックス損傷」を核として形成される溶質原子クラスター



■ マトリックス損傷(MDの式)

- APTで測定されない照射損傷を「マトリックス損傷」と総称し、脆化の第2要因として考慮
- マトリックス損傷は、照射とともに形成され続けるが、同時にその一部はクラスター形成で消費され、その分は陽には存在しないと想定してモデル化する

照射により形成されるSCとMDが転位の運動の障害物となる

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

7

1. 照射脆化予測式の開発方針

記号と名称

記号	データベースでの平均値	名称(単位)
ϕt	—	照射量(n/cm^2 , $E>1\text{MeV}$)
ϕ	ϕ^{mean}	中性子束($n/(cm^2 \cdot s)$, $E>1\text{MeV}$)
t	—	照射時間(s)
C_{Cu}^0	$C_{Cu}^{0,mean}$	鋼材のCu濃度(wt. %)
C_{Ni}^0	$C_{Ni}^{0,mean}$	鋼材のNi濃度(wt. %)
C_{Si}^0	$C_{Si}^{0,mean}$	鋼材のSi濃度(wt. %)
C_{Mn}^0	$C_{Mn}^{0,mean}$	鋼材のMn濃度(wt. %)
T_{irrad}	T_{irrad}^{mean}	照射温度(°C)

記号	名称(単位)
ΔT_{41J}	遷移温度移行量(°C)
V_f	溶質原子クラスター体積率(—)
V_{clust}	溶質原子クラスター平均体積(nm^3)
C_{Sc}	溶質原子クラスターの数密度(m^{-3})
C_{Sc}^{ind}	照射誘起クラスターの数密度(m^{-3})
C_{Sc}^{enh}	照射促進クラスターの数密度(m^{-3})
C_{MD}	マトリックス損傷の数密度(MD)(m^{-3})
C_{Cu}^{mat}	鋼材のマトリックス中に固溶しているCu濃度(マトリックスCu濃度)(wt. %)

最適化により決定する係数

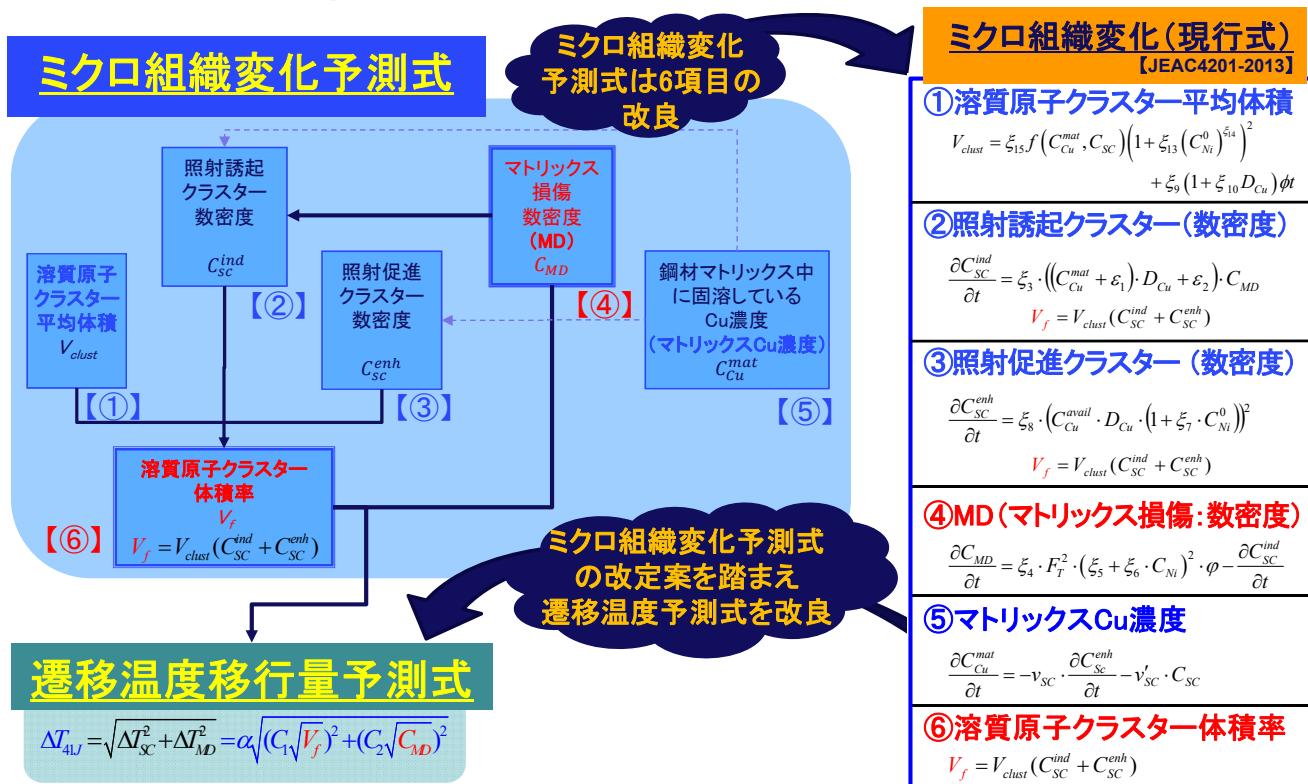
記号	名称
a_i ($i=1 \sim 14$)	溶質原子クラスターの数密度に関する係数
b_j ($j=1 \sim 5$)	マトリックス損傷の数密度に関する係数
d_k ($k=1 \sim 10$)	マトリックスCu濃度に関する係数
ξ_l ($l=1 \sim 9$)	溶質原子クラスター体積に関する係数
$C_p C_2$	降伏応力の増加に関する溶質原子クラスターとマトリックス損傷の寄与を示す係数

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

8

1. 照射脆化予測式の開発方針

脆化予測式の枠組み(ミクロ組織変化予測→遷移温度移行量予測)



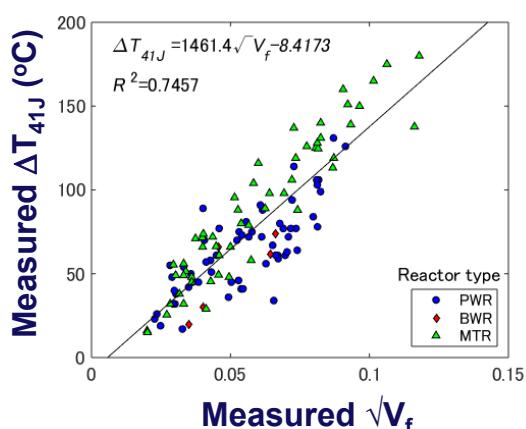
Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

9

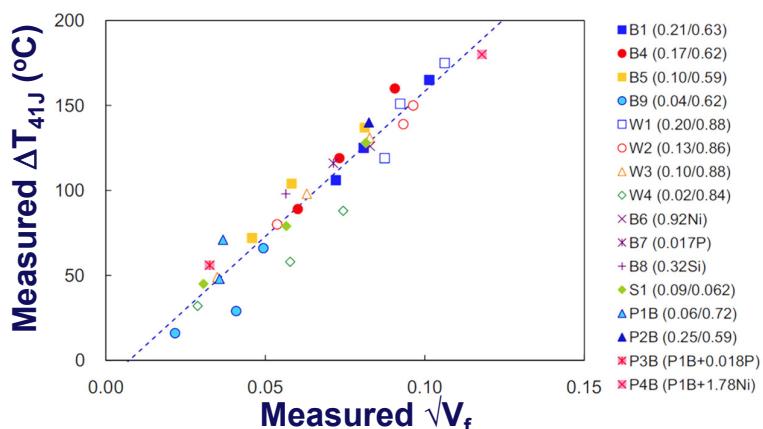
1. 照射脆化予測式の開発方針

ミクロ組織変化予測(JEAC4201-2013現行式) 溶質原子クラスター形成と脆化量の関係

- APT測定・解析で検出された溶質原子クラスターの体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度移行量(ΔT_{41J})の間に線形の相関が認められる



国内監視試験データ+試験炉照射データ



参考文献:N.Soneda et al., "Microstructural Characterization of RPV Materials Irradiated to High Fluences at High Flux", Journal of ASTM International, 2009, Vol. 6(No. 7):129-152.

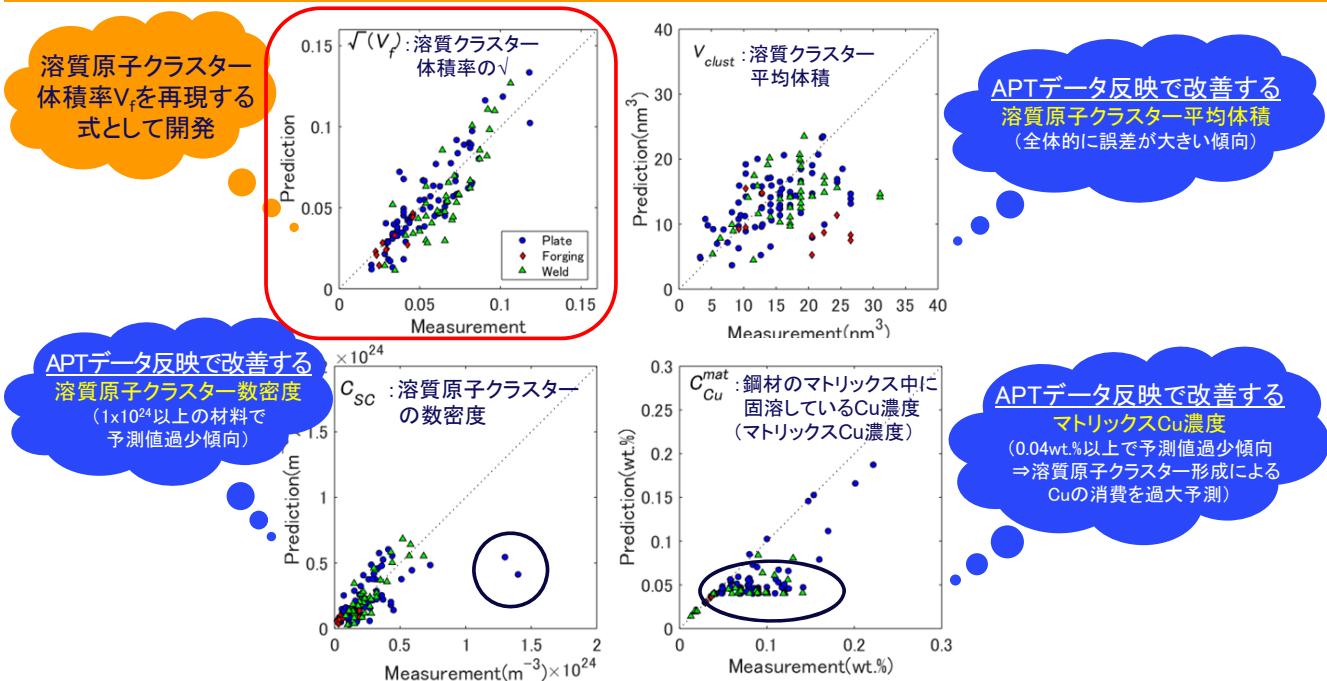
現行式:溶質原子クラスター体積率(V_f)を再現する式として開発

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

10

1. 照射脆化予測式の開発方針

JEAC4201-2013現行式によるミクロ組織変化の予測と実測



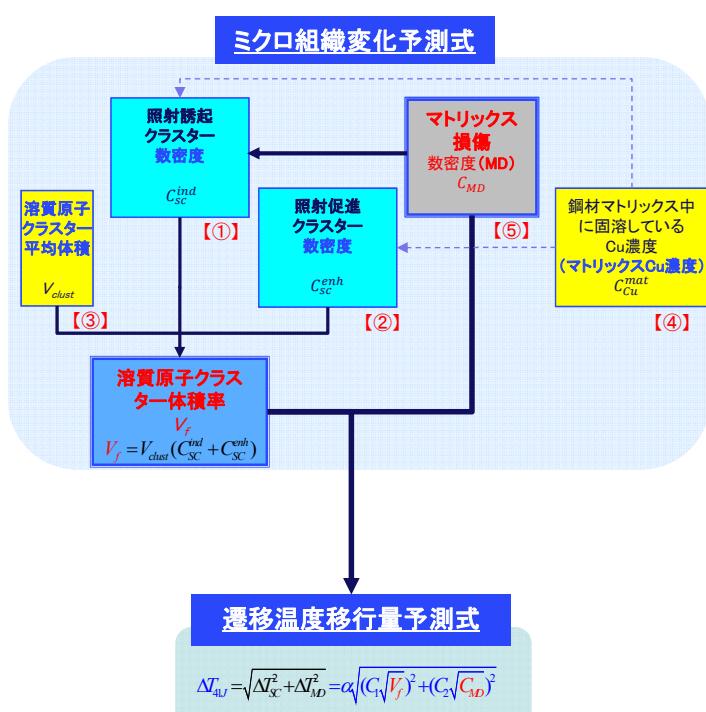
改定方針: 蓄積されたAPTデータをミクロ組織予測式に反映

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

11

1. 照射脆化予測式の開発方針

脆化予測式の枠組み(ミクロ組織変化予測)



■ 溶質原子クラスター【①②】

- APTで測定される溶質原子クラスターを指す。これを単に「溶質原子クラスター」と呼ぶ。2種類の溶質原子クラスターを考える
 - ✓ 照射促進クラスター(照射促進クラスターの式)
中性子照射により形成が促進される均一核生成による溶質原子クラスター【②】
 - ✓ 照射誘起クラスター(照射誘起クラスターの式)
中性子照射により形成される「マトリックス損傷」を核として形成される溶質原子クラスター【①】

■ 溶質原子クラスター平均体積【③】

■ マトリックスCu濃度【④】

⇒ APT測定データを再現する

■ マトリックス損傷【⑤】

- APTで測定されない照射損傷を「マトリックス損傷」と総称し脆化の第2要因として考慮
- マトリックス損傷【⑤】は、照射とともに形成され続けるが、同時にその一部はクラスター形成で消費され、その分は陽には存在しないと想定してモデル化

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

12

1. 照射脆化予測式の開発方針

2. 照射脆化予測式の検討

2.1 ミクロ組織変化予測式の検討

2.2 遷移温度移行量予測式の検討

3. 照射脆化予測式の改定案

4. まとめ

APPENDIX A ミクロ組織変化予測式

(改定提案式(近似式)の微分方程式からの導出)

APPENDIX B 転位運動の障害物モデル

(線形モデル/非線形モデルについて)

- 2.1.1 予測式に関する基本的な考え方
- 2.1.2 予測式の見直し(検討)
- 2.1.3 見直した微分式(妥当性の確認)
- 2.1.4 微分式の近似式(近似式への定式化)
- 2.1.5 予測式の比較(現行・見直した微分式・近似式)

2.1.1 ミクロ組織変化予測式に関する基本的な考え方

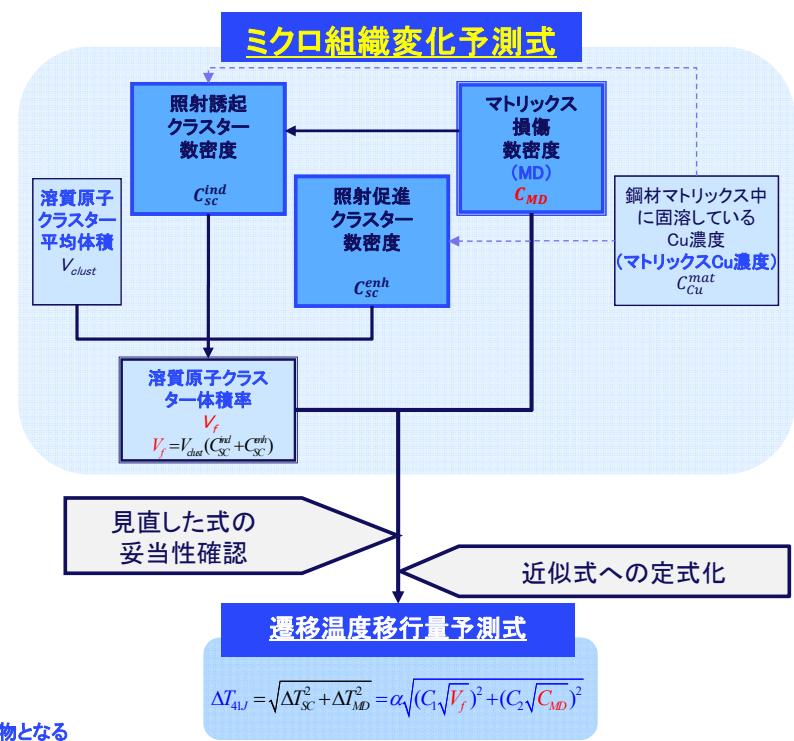
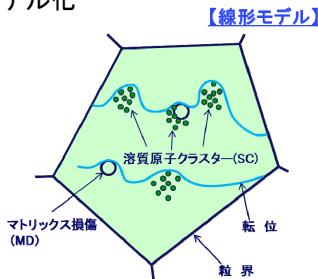
照射に伴うミクロ組織変化の予測を行う

■ 溶質原子クラスター

- APTで測定される溶質原子クラスター
- 2種類の溶質原子クラスターを考慮
 - ✓ 照射促進クラスター(照射促進SCの式)
 - ✓ 照射誘起クラスター(照射誘起SCの式)

■ マトリックス損傷(MDの式)

- APTで測定されない照射損傷、脆化の第2要因として考慮
- 照射とともに形成され続けるが、同時にその一部はクラスター形成で消費され、その分は陽には存在しないと想定してモデル化



照射により形成されるSCとMDが転位の運動の障害物となる

2.1.1 予測式に関する基本的な考え方

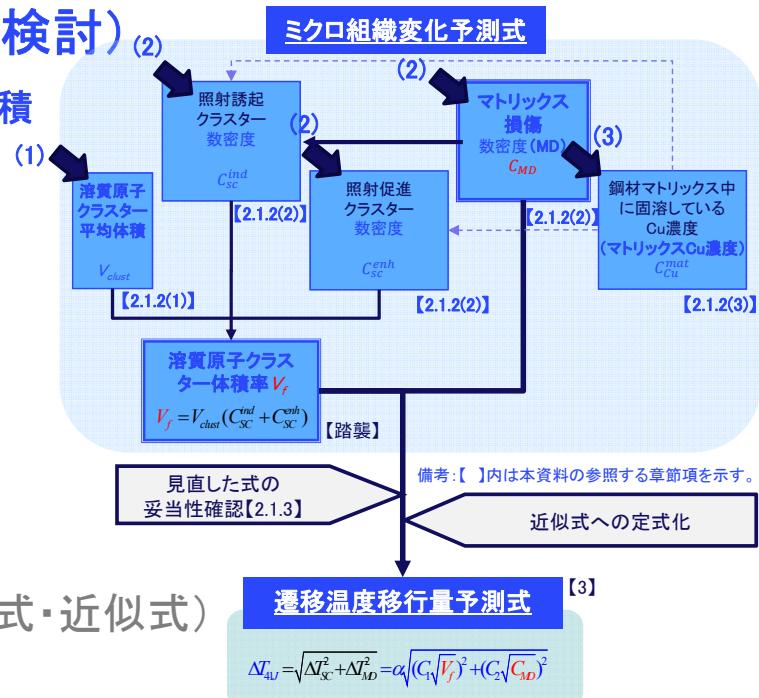
2.1.2 予測式の見直し(検討) (2)

- (1) 溶質原子クラスター平均体積
- (2) 数密度
- (3) マトリックスCu濃度

2.1.3 見直した微分式 (妥当性の確認)

2.1.4 微分式の近似式 (近似式への定式化)

2.1.5 予測式の比較 (現行・見直した微分式・近似式)



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

15

2.1.2 ミクロ組織変化予測式の見直し(検討概要)

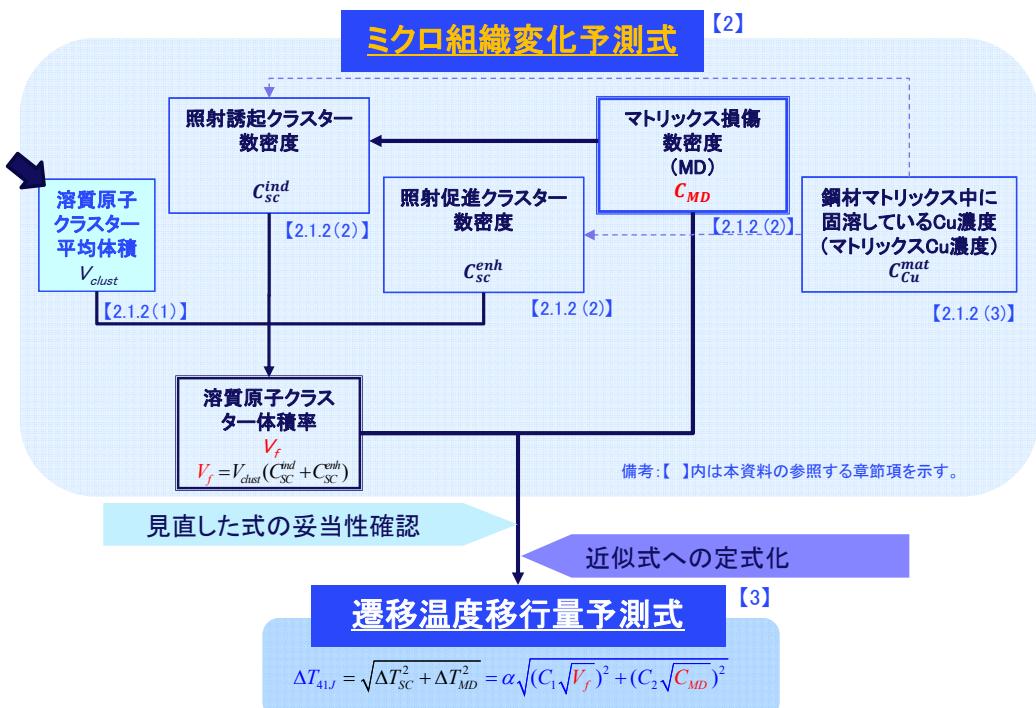
JEAC4201-2013現行式		見直した式(微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1)	溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{15} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$	V_{clust} $= (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{(1 + \zeta_4)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288}\right)} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$
(2)	照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$
	照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}}$ $\times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$
	MD (マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_t^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni})^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$
(3)	マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -\nu_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - \nu'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

16

2.1.2 ミクロ組織変化予測式の見直し>溶質原子クラスター平均体積

(1) 溶質原子クラスター平均体積: V_{clust}



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

17

2.1.2 ミクロ組織変化予測式の見直し>溶質原子クラスター平均体積

JEAC4201-2013現行式		見直した式(微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1)	溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{15} f(C_{Cu}^mat, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}} \right)^2 + \xi_9 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$	$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}} \right) \frac{\left(1 + \frac{\zeta_4}{T} \right)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288} \right)} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$
(2)	照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^mat + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^mat \right) C_{MD}$
	照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^mat - a_{14})^2$
(3)	MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni})^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$
	マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスターイド率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

18

【対象: JEAC4201-2013現行式】 溶質原子クラスター平均体積の式

$$V_{clust} = \xi_{15} \cdot f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \cdot \left(1 + \xi_{13} \cdot (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 \cdot (1 + \xi_{10} \cdot D_{Cu}) \cdot \phi t$$

V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 ξ : 現行式における最適化係数
 C_{Cu}^{mat} : 鋼材のマトリックス中に固溶している
 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度
 Cu 濃度(マトリックスCu濃度)
 ϕt : 照射量
 C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度
 D_{Cu} : Cuの拡散係数

課題: JEAC4201-2007開発時点

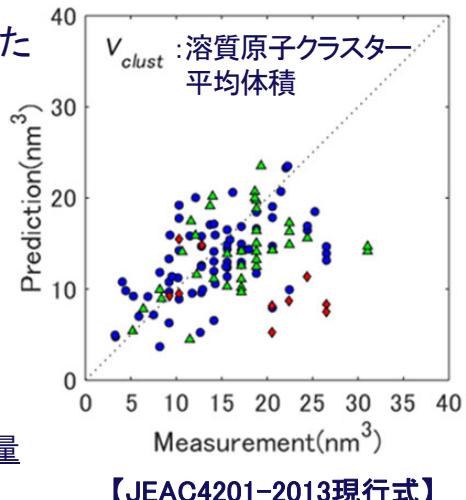
⇒ APT (Atom Probe Tomography) データ数が限られていた

《今回の見直し》

- ✓ 現在100点以上のAPTデータを取得

APTデータを再現できる式に見直し

- ① 低照射領域での溶質原子クラスター体積の見直し
(バルクCu濃度)
- ② 溶質原子クラスター体積に対するバルクCu濃度、照射量
及び照射時間の効果の考慮

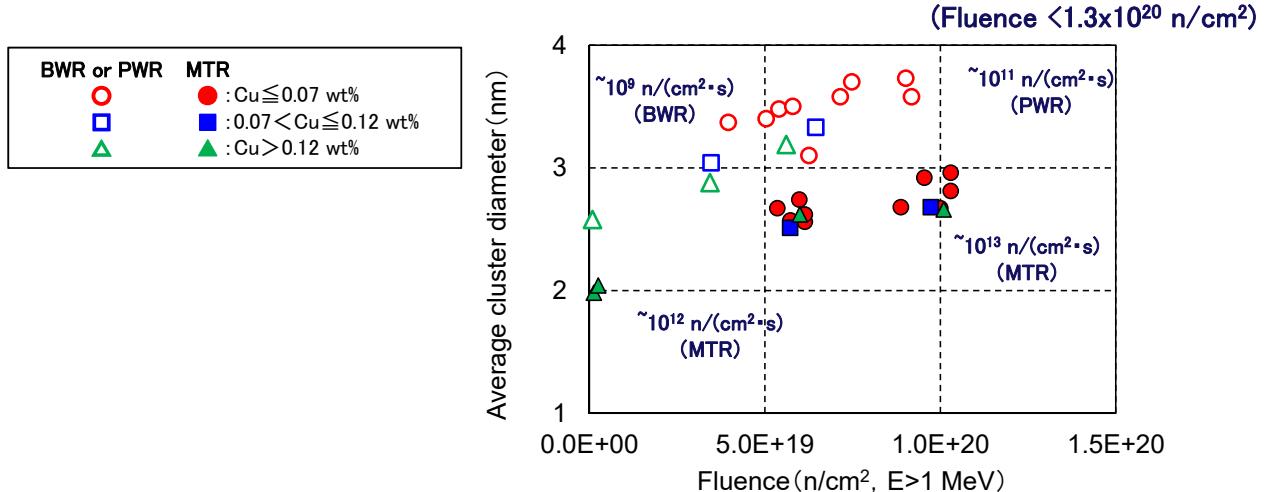


2.1.2(1) 溶質原子クラスター平均体積(見直し方針①②)

APTデータを再現できる式への見直し

- ① バルクCu濃度: 低照射領域の溶質原子クラスターサイズ(平均体積)の見直し
溶質原子クラスター平均体積はバルクCu濃度に伴って増加傾向

- ② 照射量および照射時間の溶質原子クラスター体積に対する効果の考慮
溶質原子クラスター平均体積の増加には照射量と照射時間の両者が寄与



【JEAC4201-2013現行式】溶質原子クラスター平均体積の式

$$V_{Clust} = \xi_{15} \cdot f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \cdot \left(1 + \xi_{13} \cdot \left(C_{Ni}^0\right)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 \cdot (1 + \xi_{10} \cdot D_{Cu}) \cdot \phi t$$



V_{Clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 ξ : 現行式における最適化係数
 C_{Cu}^{mat} : 鋼材のマトリックス中に固溶している Cu濃度(マトリックスCu濃度)
 C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度
 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度
 D_{Cu} : Cuの拡散係数
 ϕt : 照射量

《今回の見直し》

■ APT データの再現: 解析より以下の式を提案

- (1)項 バルクCu濃度に関する項(溶質原子クラスターの形成) ①より
- (2)項 照射量に関する項(溶質原子クラスターの成長) ②より
- (3)項 照射時間に関する項(溶質原子クラスターの成長) 中性子束効果 ②より

$$V_{clust} = A + B_1 \phi t + B_2 t$$

C_{Cu}^0 : 鋼材のCu濃度
 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度
 C_{Si}^0 : 鋼材のSi濃度
 ϕt : 照射量
 t : 照射時間
 T_{irrad} : 照射温度
 ζ_l ($l = 1 \sim 9$) : 溶質原子クラスター体積に関する係数

$$= (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{1 + \frac{\zeta_4}{288}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \frac{t}{10^9}$$

(1)項

(2)項

(3)項

2.1.2(1) 溶質原子クラスター平均体積(見直した微分式の係数フィッティング)

《係数最適化》 見直した溶質原子クラスター平均体積の式

$$V_{clust} = A + B_1 \phi t + B_2 t$$

$$= (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{1 + \frac{\zeta_4}{288}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \frac{t}{10^9}$$

C_{Cu}^0 : 鋼材のCu濃度
 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度
 C_{Si}^0 : 鋼材のSi濃度
 T_{irrad} : 照射温度
 ζ_l ($l = 1 \sim 9$) : 溶質原子クラスター体積に関する係数

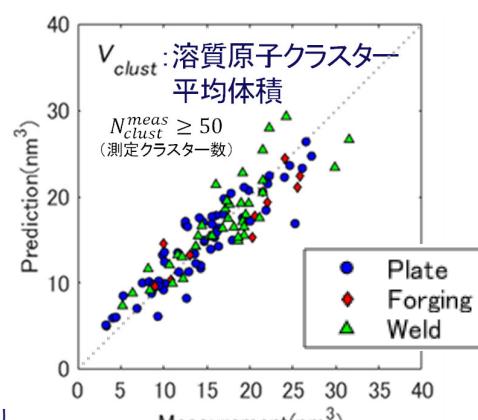
係数 $\zeta_1 \sim \zeta_9$ をAPTデータ(平均の溶質原子クラスター体積)を用いてフィッティング



$$Obj = \frac{\sum (V_{clust}^{pred} - V_{clust}^{meas})^2}{\sum (V_{clust}^{meas})^2}$$

上付添字 *pred*: 予測値 *meas*: 測定値

が最小になるように最適化



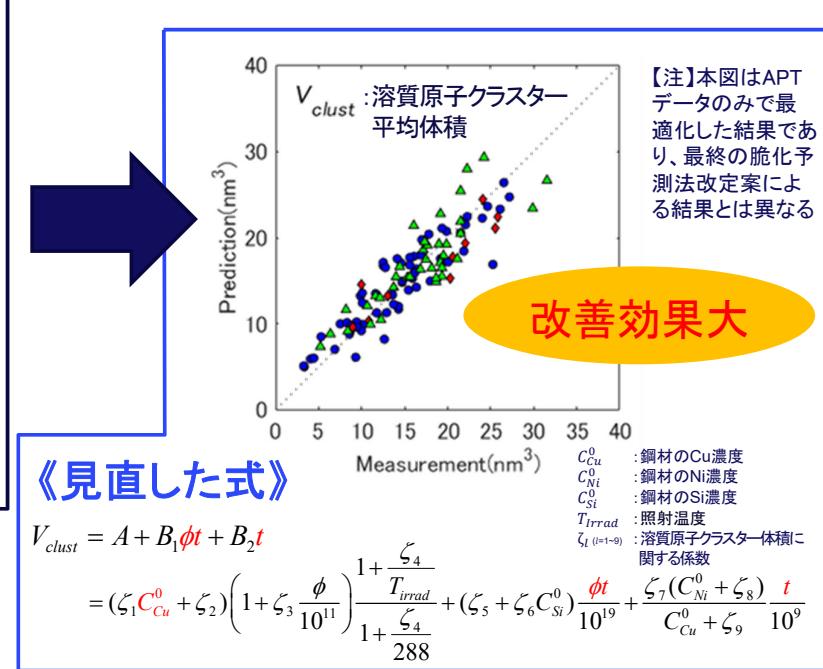
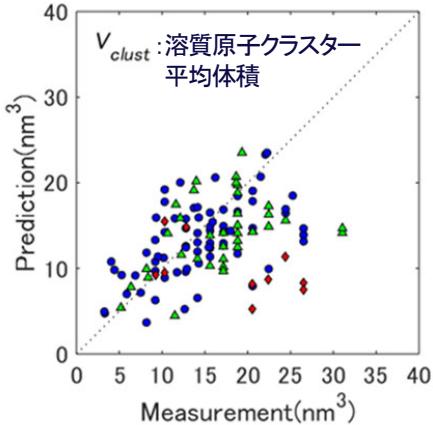
【注】本図はAPTデータのみで最適化した結果であり、最終の脆化予測法改定案による結果とは異なる

2.1.2(1) 溶質原子クラスター平均体積（見直した微分式による予測の改善）

【JEAC4201-2013現行式】

$$V_{clust} = \xi_{15} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}} \right)^2 + \xi_9 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$$

V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 ξ : 現行式の最適化係数
 C_{Cu}^{mat} : マトリックスCu濃度
 C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度
 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度
 D_{Cu} : CuO拡散係数
 ϕ : 照射量

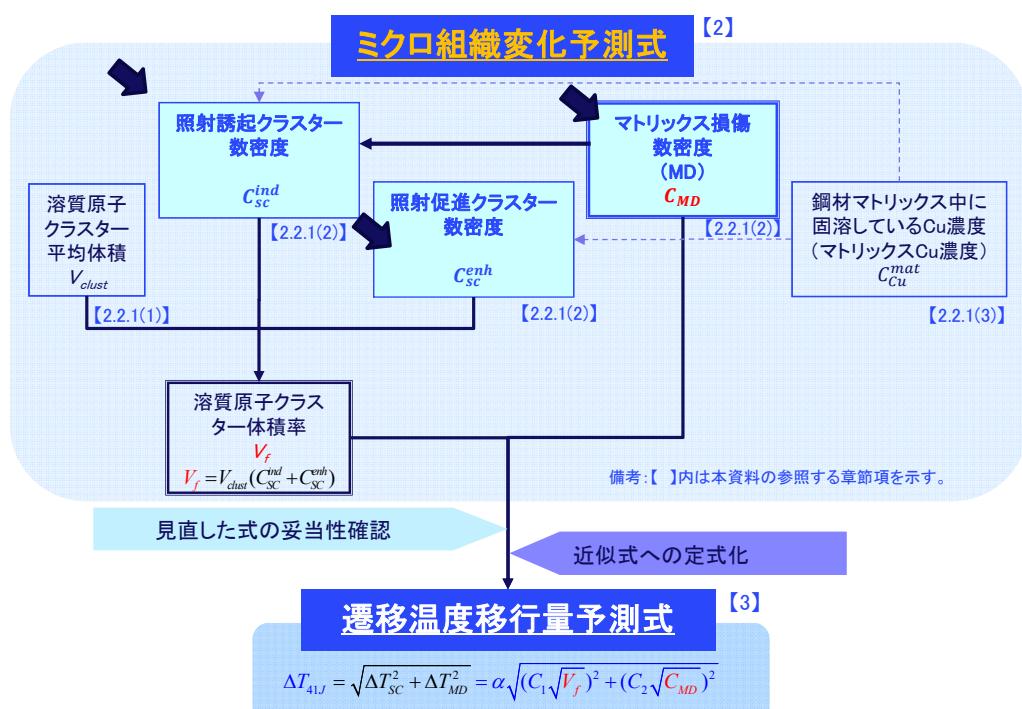


Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

23

2.1.2(2) ミクロ組織変化予測式の見直し>数密度の式

(2) 数密度の式: C_{SC}^{ind} , C_{SC}^{enh} , C_{MD}



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

24

2.1.2 (2) ミクロ組織変化予測式の見直し>数密度の式

JEAC4201-2013現行式		見直した式(微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1)	溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{15} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$	$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{\left(1 + \frac{\zeta_4}{T}\right)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288}\right)} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$
(2)	照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^{mat}\right) C_{MD}$
	照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}}\right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}}\right)^{a_9}\right\} \left\{1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}}\right)^{a_{11}}\right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_{12}} \times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}}\right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$
	MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni})^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}}\right)^{b_3}\right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}}\right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$
(3)	マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}}\right)^{d_4}\right\} \left\{1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}}\right)^{d_7}\right\} \left\{1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}}\right)^{d_{10}}\right\} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

25

2.1.2 (2) 数密度の式(見直し方針)

数密度の式: C_{SC}^{ind} , C_{SC}^{enh} , C_{MD}

C_{SC}^{ind} : 照射誘起クラスターの数密度
 C_{SC}^{enh} : 照射促進クラスターの数密度
 C_{MD} : マトリックス損傷の数密度

《今回の見直し》

単純なフィッティングの式に変更(MD式も同様)

化学組成、中性子束、照射温度を考慮する際の関数形について、

ASTM E900-15を参考に統一。



①化学組成

$$1 + a_i \left(\frac{C_X^0}{C_{X,mean}}\right)^{a_j}$$

②中性子束

$$\left(1 + a_k \frac{\phi}{\phi^{mean}}\right)^{a_l}$$

③照射温度

$$1 + \frac{a_m}{T_{irrad}}$$

$C_{X,mean}^0$: 鋼材の化学成分X(Ni, Si, Mn)の平均濃度
 T_{irrad} : 照射温度
 a_i ($i=1 \sim 14$): 溶質原子クラスターの数密度に関する係数

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

26

2.1.2 (2) 数密度の式(見直した微分式)

JEAC4201-2013

【現行式】

照射誘起クラスター(C_{SC}^{ind})

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$$

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$$

ξ : 現行式における最適化係数
 D_{Cu} : Cuの拡散係数

照射促進クラスター(C_{SC}^{enh})

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$$

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$$

η : 現行式における最適化係数

MD(マトリックス損傷 C_{MD})

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni})^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

F_T : 温度依存項

《見直した式》

■単純なフィッティングの式

■ASTM E900-15を参考に関数形統一



$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$$

②中性子束

C_{SC}^{ind} : 照射誘起クラスターの数密度

C_{Cu}^{mat} : 鋼材のマトリックス中に固溶している Cu濃度(マトリックスCu濃度)

C_{MD} : マトリックス損傷の数密度

$a_j(j=1-14)$: 溶質原子クラスターの数密度に関する係数



$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left\{ 1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right\}^{a_{12}}$$

①化学組成(SiとMn)
②中性子束
③照射温度

C_{Si}^0 : 鋼材のSi濃度

C_{Mn}^0 : 鋼材のMn濃度

C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度

ϕ : 中性子束

T_{Irrad} : 照射温度



$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{Irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

①化学組成(Ni) ③照射温度

$b_j(j=1-5)$: マトリックス損傷の数密度に関する係数

化学組成: 現行式パラメータに対し、残差分析の結果を踏まえMn及びSi等も考慮

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

27

2.1.2 (2) 数密度の式(見直した式: 化学成分Siの影響検討の例)

検討例(参考): C_{SC}^{enh} の予測残差評価の一例

JEAC4201-2013

予測残差 = C_{SC} 予測値 - C_{SC} 実測値

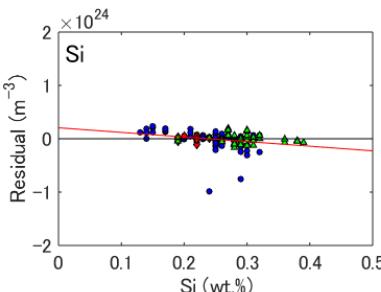
C_{SC}^{enh} : 照射促進クラスターの数密度

【現行式】

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$$

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$$

D_{Cu} : Cuの拡散係数
 ξ, η : 現行式における最適化係数



《見直した微分式》

* 図中の赤線は残差の傾向を表す

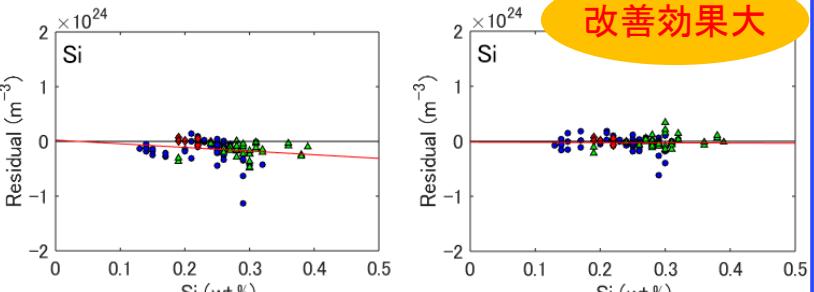
$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{Irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$$

C_{Si}^0 : 鋼材のSi濃度 C_{Mn}^0 : 鋼材のMn濃度 C_{Ni}^0 : 鋼材のNi濃度

ϕ : 中性子束 T_{Irrad} : 照射温度

$a_j(j=1-14)$: 溶質原子クラスターの数密度に関する係数

改善効果大

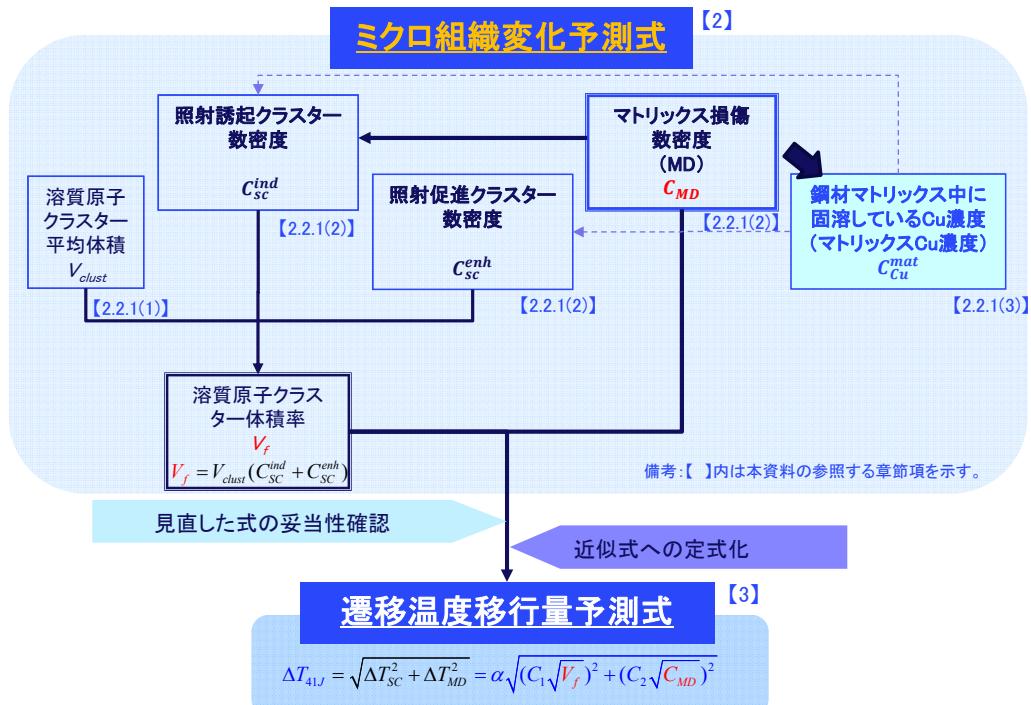


【注】本図は微分方程式の形式による改善効果の試算例であり、最終の脆化予測法改定案による結果ではない

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

28

(3) マトリックスCu濃度: C_{Cu}^{mat}



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry. All Right Reserved.

29

2.1.2 (3) ミクロ組織変化予測式の見直し>マトリックスCu濃度

JEAC4201-2013現行式		見直した式(微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1)	溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{15} f \left(C_{Cu}^{mat}, C_{SC} \right) \left(1 + \xi_{13} \left(C_{Ni}^0 \right)^{\xi_{14}} \right)^2 + \xi_9 \left(1 + \xi_{10} D_{Cu} \right) \phi t$	$V_{clust} = \left(\zeta_1 \textcolor{red}{C_{Cu}^0} + \zeta_2 \right) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}} \right) \frac{\left(1 + \frac{\zeta_4}{4} \right)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288} \right)} + \left(\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0 \right) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 \left(C_{Ni}^0 + \zeta_8 \right) t}{\left(C_{Cu}^0 + \zeta_9 \right) 10^9}$
(2)	照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left(\left(C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1 \right) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^{mat} \right) C_{MD}$
	照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot \left(C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot \left(1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0 \right)^2 \right)$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}}$ $\times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) \left(C_{Cu}^{mat} - a_{14} \right)^2$
	MD (マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T \cdot \left(\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni} \right)^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$
(3)	マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -\nu_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - \nu'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{\left(C_{Cu}^0 \right)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

【JEAC4201-2013現行式】マトリックスCu濃度の式

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{Sc}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$$

溶質原子クラスター成長によるCuの減少
溶質原子クラスター形成によるCuの減少

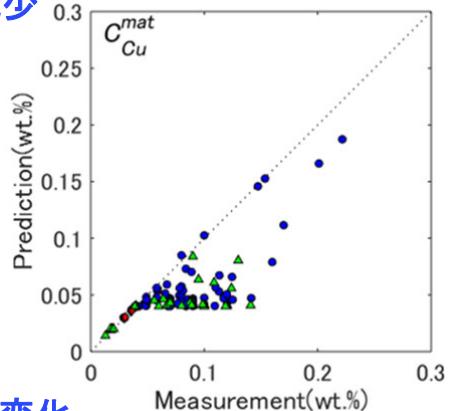
課題: C_{Cu}^{mat} は、0.04 wt.%以上で、
APTデータを再現できていない

《今回の見直し》

⇒現在100点以上のAPTデータを取得

APTデータを再現できる式に見直し

- ① 溶質原子クラスター当たりの平均原子数の変化
- ② 照射温度と中性子束の影響



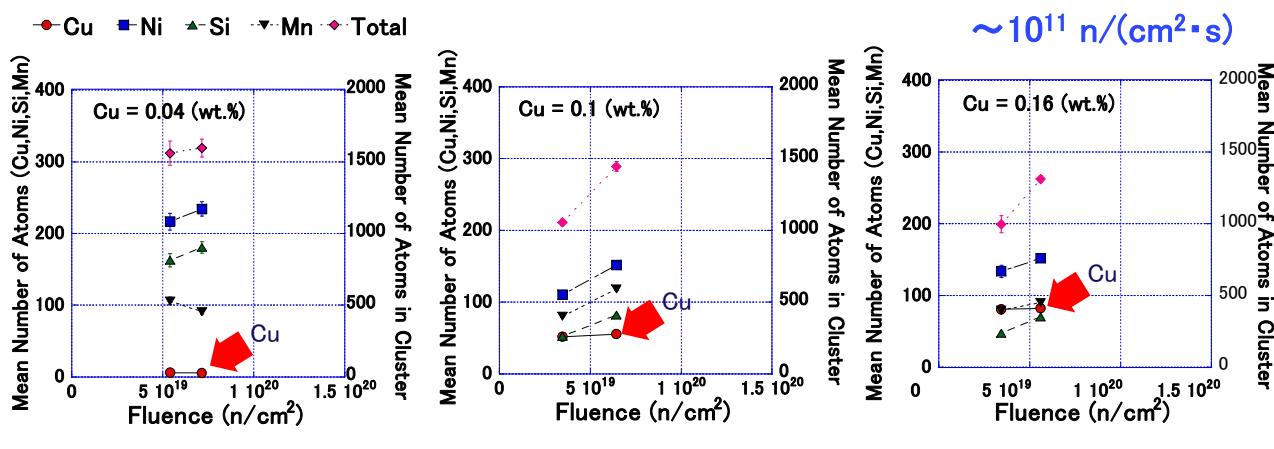
JEAC4201-2013現行式

【次スライド参照】

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

31

①溶質原子クラスターあたりの平均原子数の変化



低Cu

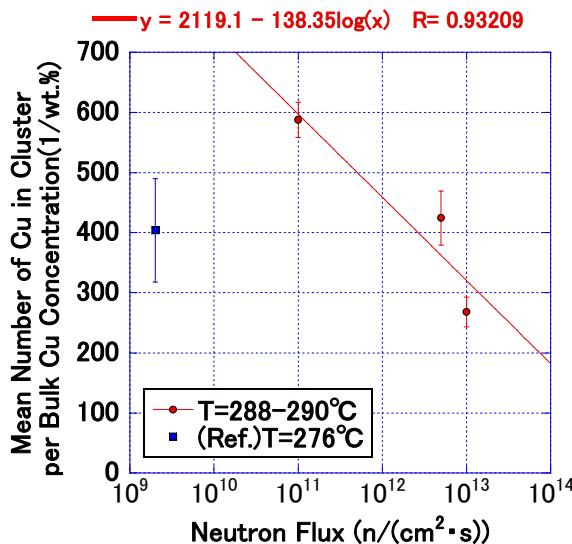
高Cu

- Cu原子数は照射量の増加に伴って増加しない
- Cu原子数はバルクCu濃度に伴って増加

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

32

②照射温度と中性子束の影響



溶質原子クラスター当たりの平均Cu原子数は照射温度と中性子束の影響を受ける

2.1.2 (3) マトリックスCu濃度(見直した式と係数フィッティング)

JEAC4201-2013

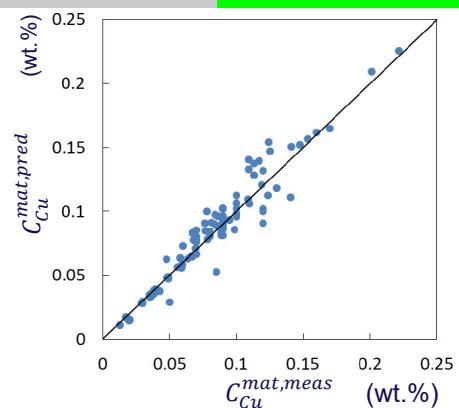
【現行式】

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$$

C_{SC}^{enh} : 照射促進クラスターの数密度
 C_{SC} : 溶質原子クラスターの数密度

溶質原子クラスター成長によるCuの減少
 溶質原子クラスター形成によるCuの減少

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC}(Cu, \phi, T) \cdot \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} \rightarrow C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - v_{SC} \cdot C_{SC}$$



【注】C_{Cu}^{mat,pred}の計算に際してはC_{SC}^{meas}を使用

《見直した式》 係数d₁～d₁₀は測定データ(C_{Cu}^{mat,meas})を用いてフィッティング

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$$

バルクCu濃度 中性子束 温度に関する項

$$Obj = \frac{\sum (C_{Cu}^{mat,pred} - C_{Cu}^{mat,meas})^2}{\sum (C_{Cu}^{mat,meas})^2}$$

バルクCu濃度 APTで得られたマトリックスCu濃度
 APTで得られたバルクCu濃度

上付添字 pred: 予測値 meas: 測定値 mean: データベースの平均値

2.1.2 ミクロ組織変化予測式の見直し(まとめ)

JEAC4201-2013現行式	見直した式(微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1) 溶質原子クラスター平均体積 $V_{clust} = \xi_{15} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \xi_{13} (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 \left(1 + \xi_{10} D_{Cu}\right) \phi t$	$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{\left(1 + \frac{\zeta_4}{T}\right)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288}\right)} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{SC}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$ <p>2.1.2(1) 溶質原子クラスター平均体積の式 APTデータの再現性 ✓ 低照射領域での平均体積の見直し(バルクCu濃度) ✓ 溶質原子クラスター体積に対する照射量および照射時間の効果の考慮 改善効果大</p>
(2) 照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{q_1}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$ <p>2.1.2(2) 数密度(溶質原子クラスターとMD)の式 ✓ 単純なフィッティングの式 ✓ ASTM E900-15を参考に関数形統一 • 化学組成(Si,Mn,Ni) • 中性子束 • 照射温度 改善効果大 (予測残差改善) APPENDIX A</p>
(3) MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_I^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$ <p>2.1.2(3) マトリックスCu濃度の式 APTデータの再現性 ✓ 溶質原子クラスター当たりの平均原子数の変化 ● 照射量に伴って増加しない ● バルクCu濃度に伴って増加 ✓ 照射温度と中性子束の影響 溶質原子クラスター当たりの平均Cu原子数は照射温度と中性子束の影響を受ける</p>

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

35

2.1.3 見直した微分式(妥当性の確認)

2.1.1 予測式に関する基本的な考え方

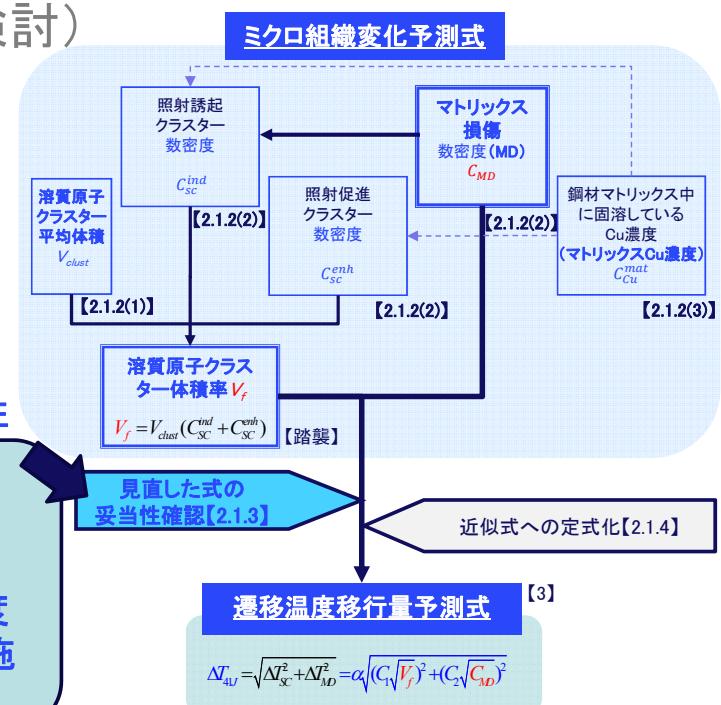
2.1.2 予測式の見直し(検討)

- (1) 溶質原子クラスター平均体積
- (2) 数密度
- (3) マトリックスCu濃度

2.1.3 見直した微分式 (妥当性の確認)

- (1) 係数最適化による確認
- (2) ミクロ組織変化予測式の妥当性

- 見直したミクロ組織変化予測式が機能しているかの確認を実施
- 最終的な係数の最適化は、ミクロ組織変化予測式⇒遷移温度移行量予測式のプロセス後に実施(⇒3章)



Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

36

2.1.3 見直した微分式(妥当性の確認)

(1) 係数最適化による確認

見直したミクロ組織変化予測式が機能しているかを確認

■ 目的関数が最小になるように係数を最適化

$$Obj_{micro} = \frac{\sum (V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum (V_f^{meas})^2} \rightarrow \min$$

V_f : 溶質原子クラスター体積率(－)
上付添字
 $pred$: 予測値
 $meas$: 測定値

最適化対象: 溶質原子クラスター体積率

● 最適化した係数(相互作用がある項)

- a_i : 溶質原子クラスター(促進SCと誘起SC)の数密度に関する係数
- b_j : マトリックス損傷(誘起SCとの相互作用)の数密度に関する係数

● 固定した係数(直接求められる項)

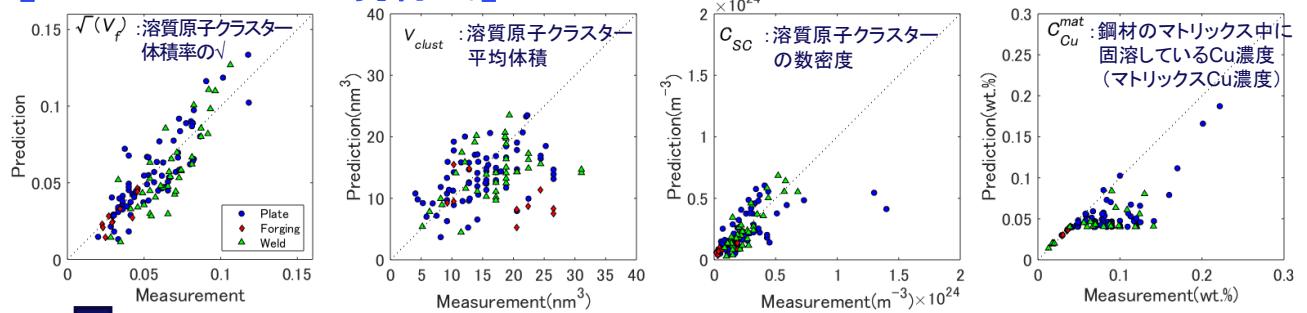
- d_k : マトリックスCu濃度に関する係数
- ζ_1 : 溶質原子クラスター平均体積に関する係数

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

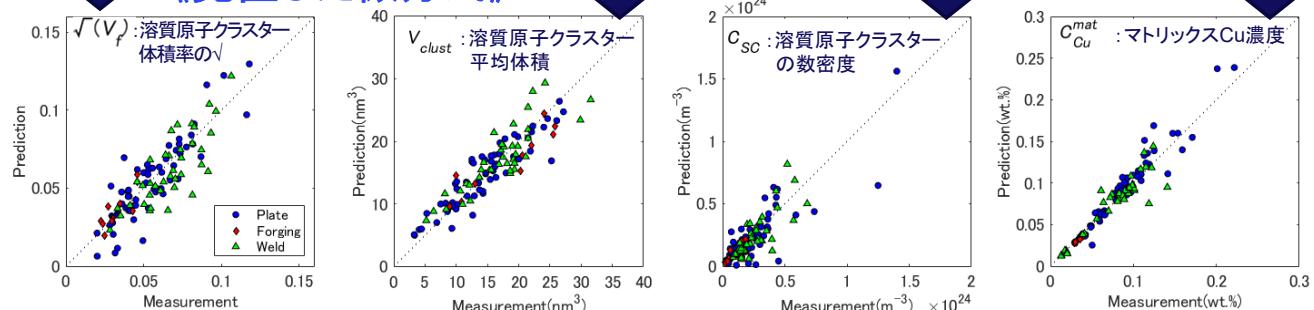
37

2.1.3 (2) ミクロ組織変化予測式の妥当性

【JEAC4201-2013現行式】



↓ 《見直した微分式》 ↓



【注】本図はAPTデータのみで最適化した結果であり、最終の脆化予測法改定案による結果とは異なる

ミクロ組織変化の予測性(機能)は改善

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

38

2.1.4 見直した微分方程式の近似式(近似式への定式化)

見直した式(微分方程式)を①②で近似し、解析的に解くことを可能に

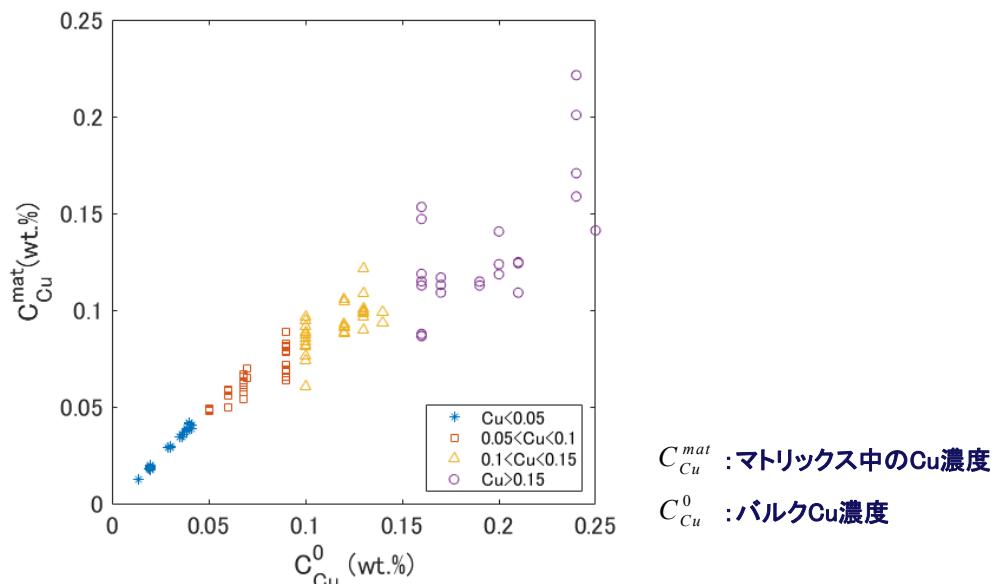
JEAC4201-2013現行式		見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)
(1) 溶質原子クラスター平均体積	$V_{clust} = \xi_{13} f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \left(1 + \frac{\zeta_{13}}{10^{11}} (C_{Ni}^0)^{\zeta_{14}}\right)^2 + \xi_9 (1 + \xi_{10} D_{Cu}) \phi t$	$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{\left(1 + \frac{\zeta_4}{T}\right)}{\left(1 + \frac{\zeta_4}{288}\right)} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$
(2) 照射誘起クラスター数密度	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \varphi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}}\right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$
(2) 照射促進クラスター数密度	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \varphi^{\eta_2}$	$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\}$ $\times \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$
(3) MD(マトリックス損傷)数密度	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$
(3) マトリックスCu濃度	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -V_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - V'_{SC} \cdot C_{SC}$	$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t}$
現状のまま	溶質原子クラスター体積率	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

39

2.1.4 見直した微分方程式の近似式(近似式への定式化)

【①の仮定に関する実験データ】



①マトリックス中のCu濃度はバルクCu濃度に概ね比例すると仮定

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

40

2.1.4 見直した微分方程式の近似式(近似式への定式化)

鋼材の化学組成(Cu,Ni, Si, Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、ミクロ組織変化に関する物理量を以下のような照射時間の関数として扱う。(※照射量 = 中性子束 × 照射時間)

溶質原子クラスター平均体積

$$V_{clust} = A + Bt$$

照射誘起クラスター数密度

$$C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

照射促進クラスター数密度

$$C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1} \right)$$

マトリックス中のCu濃度(マトリックスCu濃度)

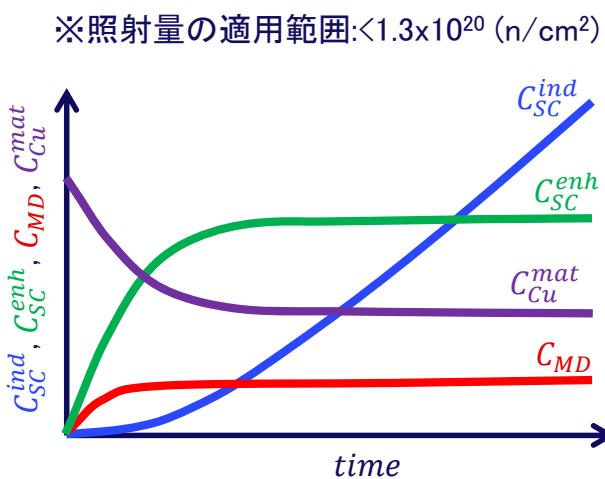
$$C_{\mathcal{U}}^{mat} = C_{\mathcal{U}}^0 - \delta_1 C_{\mathcal{S}\mathcal{C}}^{enh}$$

マトリックス損傷(MD)数密度

$$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

溶質原子クラスター一体積率

$$V_f = V_{clust}(C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$



備考:本図は照射量の適用範囲の範囲で各物理量の時間依存性を模式的に示したものです

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry. All Right Reserved.

41

2.1.4 見直した微分方程式の近似式(近似式への定式化)

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
溶質原子クラスター平均体積	$V_{Clust} = A + Bt$
係数式	$V_{Clust} = A + Bt$
$A = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}} \right) \frac{1 + \frac{\zeta_4}{T_{irrad}}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}}, \quad B = (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \frac{1}{10^9}$	
マトリックスCu濃度	$C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh}$
$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\}$	係数式
$\times \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$	$\delta_1 = d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\}$ $\times \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\}$

2.1.4 見直した微分方程式の近似式(近似式への定式化)

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \times \left(1 + a_4 C_{Cu}^{mat} \right) C_{MD}$	$C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$ <p style="color: blue;">係数式</p> $\alpha_1 = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^0 \right)$ $\gamma_1 = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right)$
MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \times \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$ <p style="color: blue;">係数式</p> <p>照射誘起クラスター数密度の係数式α_1及びγ_1と同一</p>

Φ [n/cm²·s] : 中性子束 T_{irrad} [°C] : 照射温度 C_{Si}^0 [wt.%] : 鋼材中のSi含有量
 Φt [n/cm²] : 照射量 C_{Cu}^0 [wt.%] : 鋼材中のCu含有量 C_{Mn}^0 [wt.%] : 鋼材中のMn含有量
 t [s] : 照射時間 C_{Ni}^0 [wt.%] : 鋼材中のNi含有量 mean : データベースの平均値

43

2.1.4 見直した微分方程式の近似式(近似式への定式化)

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

見直した式 (微分方程式形式のミクロ組織変化予測式)	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \times \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \times \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) \left(C_{Cu}^{mat} - a_{14} \right)^2$	$C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1} \right)$ <p style="color: blue;">係数式</p> $\beta_4 = \begin{cases} \frac{C_{Cu}^0 - \beta_2}{\delta_1}, C_{Cu}^0 - \beta_2 > 0 & \beta_3 = \beta_1 (\delta_1)^2 \\ 0, & C_{Cu}^0 - \beta_2 \leq 0 & \beta_2 = a_{14} \end{cases}$ $\beta_1 = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \times \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right)$
溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

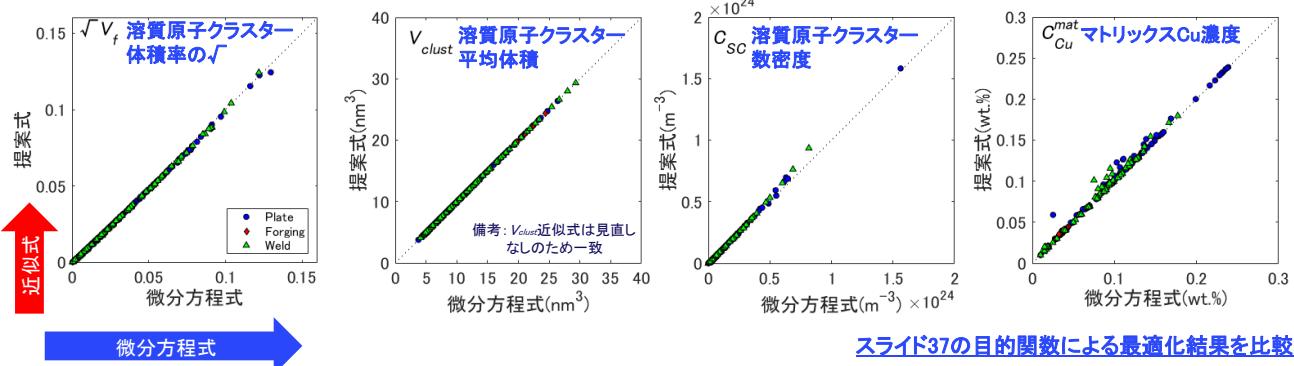
Φ [n/cm²·s] : 中性子束 T_{irrad} [°C] : 照射温度 C_{Si}^0 [wt.%] : 鋼材中のSi含有量
 Φt [n/cm²] : 照射量 C_{Cu}^0 [wt.%] : 鋼材中のCu含有量 C_{Mn}^0 [wt.%] : 鋼材中のMn含有量
 t [s] : 照射時間 C_{Ni}^0 [wt.%] : 鋼材中のNi含有量 mean : データベースの平均値

44

ミクロ組織変化予測式見直した微分式(微分方程式形式)と近似式(定式化した式)の比較

横軸: 見直した式(微分方程式)による予測

縦軸: 近似式(改定提案式)による予測



【注】本図はAPTデータのみで最適化した結果に基づき、近似式と微分方程式の結果を比較したものであり、最終の脆化予測法改定案による結果とは異なる

近似式でも微分方程式の数値解と同程度に予測可能

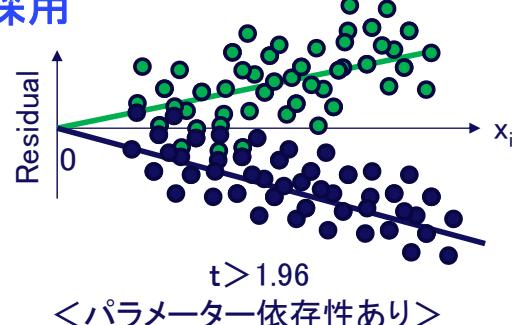
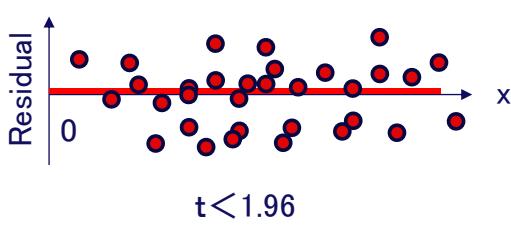
2.1.5 ミクロ組織変化予測式の比較(t検定による予測残差評価)

ミクロ組織変化予測式JEAC4201-2013現行式と、見直した微分式・近似式の比較

■ t検定を用いて、予測残差のパラメーター依存性を評価

- ✓ $t < 1.96$ の場合 ⇒ 残差にパラメーター依存性がない
- ✓ $\sum t^2$ が最小となるものを候補の中から探す

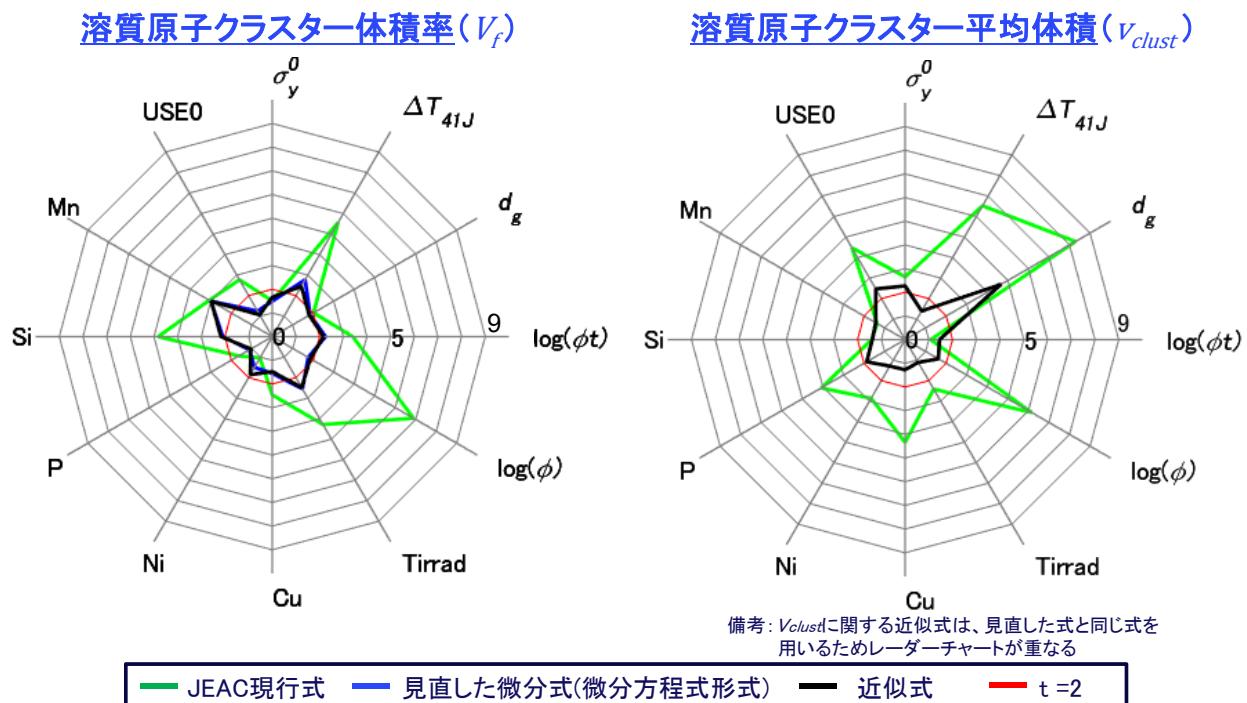
■ ASTM E900-15と同様の手法を採用



t < 1.96 であれば残差にパラメータ依存性がないと判断

2.1.5 ミクロ組織変化予測式の比較(t 検定による予測残差評価)

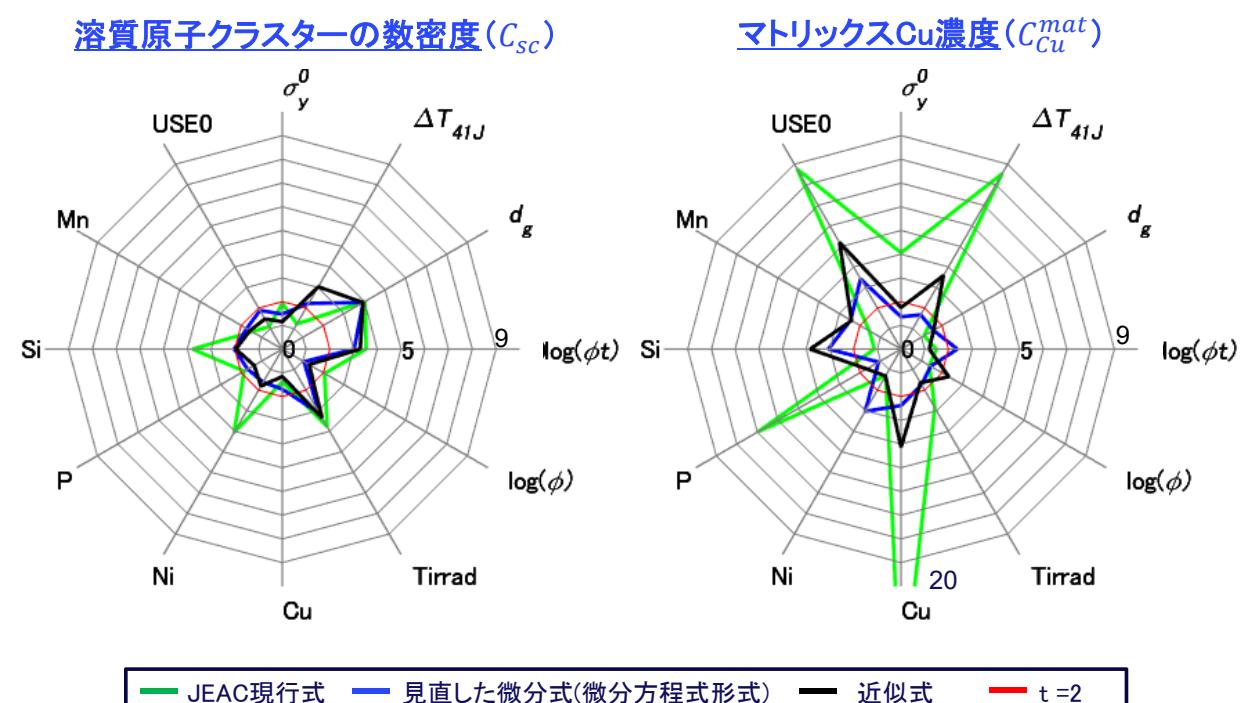
ミクロ組織変化の予測残差に関するレーダーチャート



$t < 1.96$ (赤サークル)であれば残差にパラメータ依存性がないと判断

2.1.5 ミクロ組織変化予測式の比較(t 検定による予測残差評価)

ミクロ組織変化の予測残差に関するレーダーチャート



$t < 1.96$ (赤サークル)であれば残差にパラメータ依存性がないと判断

ミクロ組織変化予測式の予測残差に関する標準偏差

	V_f	C_{sc} (m ⁻³)	C_{Cu}^{mat} (wt.%)	V_{clust} (nm ³)
JEAC4201-2013 現行式	1.7E-03	1.5E+23	2.7E-02	6.7
見直した微分式 (微分方程式形式)	1.6E-03	1.2E+23	1.2E-02	2.5
近似式	1.6E-03	1.2E+23	1.2E-02	2.5

V_f	: 溶質原子クラスタ一体積率
V_{clust}	: 溶質原子クラスター平均体積
C_{sc}	: 溶質原子クラスターの数密度
C_{mat}	: 鋼材のマトリックス中に固溶している
C_{Cu}	Cu濃度(マトリックスCu濃度)

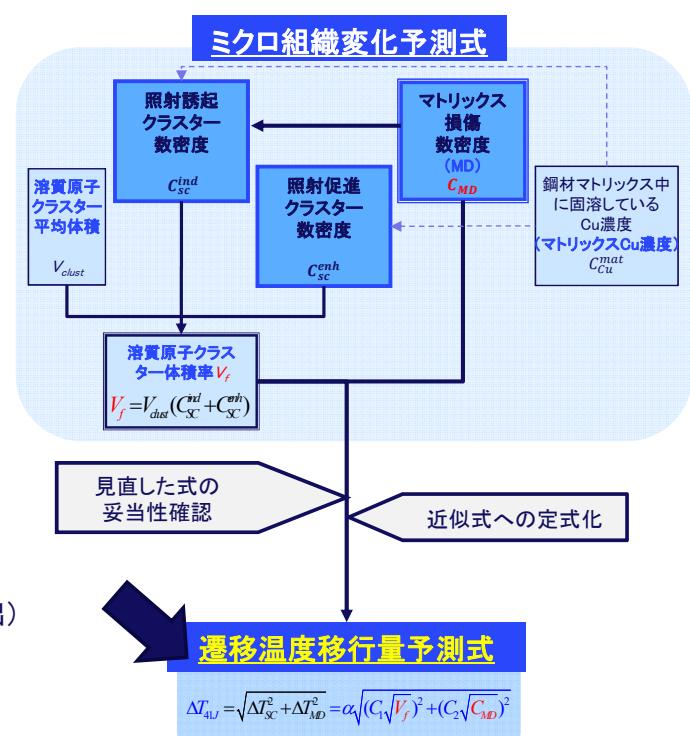
近似式を用いても見直した微分式と同等の予測性能を確保

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry. All Right Reserved.

49

2.2 遷移温度移行量予測式の検討

1. 照射脆化予測式の開発方針
 2. 照射脆化予測式の検討
 - 2.1 ミクロ組織変化予測式の検討
 - 2.2 遷移温度移行量予測式の検討
 - 2.2.1 検討方針
 - (1) 予測式について
 - (2) 目的関数による係数の最適化について
 - 2.2.2 予測式の検討(残差評価)
 3. 照射脆化予測式の改定案
 4. まとめ



APPENDIX A ミクロ組織変化予測式 (改定提案式(近似式)の微分方程式からの導出)

APPENDIX B 転位運動の障害物モデル (線形モデル/非線形モデルについて)

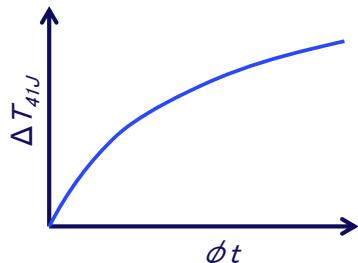
2.2.1 遷移温度移行量予測式の検討方針

遷移温度移行量予測式(線形モデル)

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

$\Delta \sigma_y$: 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)による降伏応力上昇分
 α : 比例係数($\alpha = 0.6$)

$$\Delta \sigma_y = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$



ミクロ組織変化予測式(近似式)

$$\text{マトリックス損傷数密度} : C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

$$\text{溶質原子クラスター体積率} : V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$

$$\text{溶質原子クラスター平均体積} : V_{Clust} = A + Bt$$

$$\text{照射誘起クラスター数密度} : C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$$

$$\text{照射促進クラスター数密度} : C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1}\right)$$

現状の知見として、溶質原子クラスターとマトリックス損傷が短範囲相互作用するとして二乗和平方根(線形モデル)を用いる

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

51

2.2.1 遷移温度移行量予測式の検討方針

線形モデルにおける二乗和平方根の採用

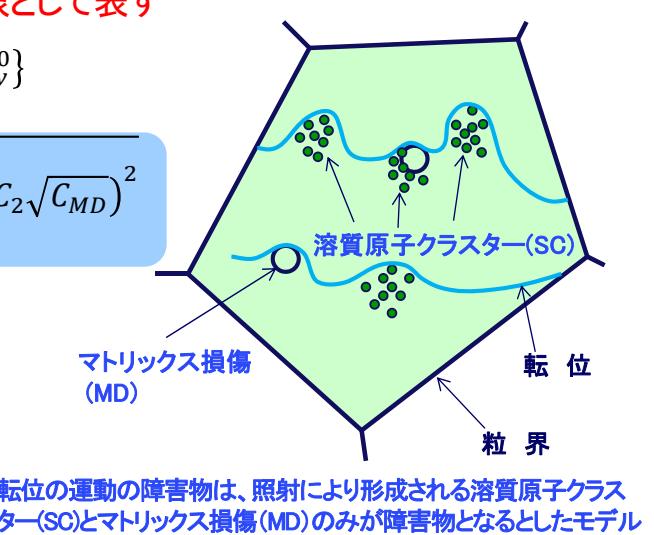
溶質原子クラスターとマトリックス損傷の各因子による照射硬化への全寄与分を各因子の寄与分の二乗和平方根として表す

$$\begin{aligned} \Delta T_{41J} &= \alpha \Delta \sigma_y \quad \Delta \sigma_y = \{(\sigma_y^0 + \sigma_{ID}) - \sigma_y^0\} \\ &= \sigma_{ID} \\ &= \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2} \end{aligned}$$

σ_y^0 : 初期降伏応力

σ_{ID} : 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)の寄与による降伏応力上昇量

$$\sigma_{ID} = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$



初期降伏応力の照射脆化への影響を考慮したモデル(非線形モデル【APPENDIX B参照】)は、未知の知見や課題があり今回は採用を見送り
 ⇒今後の課題

52

2.2.1 遷移温度移行量予測式の検討方針

(2) 目的関数による係数最適化について 目的関数

$$Obj = \frac{\bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}}}{①} + \frac{\bar{B} \cdot Obj_{V_f}}{②} + \frac{\bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}}}{③} + \frac{\bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}}}{④} + \frac{\bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}}}{⑤} \rightarrow \min$$

$$\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$$

①遷移温度移行量の寄与分

$$Obj_{\Delta T_{41J}} = \frac{\sum(\Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} - \Delta T_{41J,k}^{meas})^2}{\sum(\Delta T_{41J,k}^{meas})^2}$$

$$\Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} = \Delta T_{41J,k}^{pred} + \frac{\sum(\Delta T_{41J,k}^{meas} - \Delta T_{41J,k}^{pred})}{N+1}$$

②溶質原子クラスター一体積率の寄与分

$$Obj_{V_f} = \frac{\sum(V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum(V_f^{meas})^2}$$

④溶質原子クラスター数密度の寄与分

$$Obj_{C_{SC}} = \frac{\sum(C_{SC}^{pred} - C_{SC}^{meas})^2}{\sum(C_{SC}^{meas})^2}$$

③マトリックスCu濃度の寄与分

$$Obj_{C_{Cu}^{mat}} = \frac{\sum(C_{Cu}^{mat,pred} - C_{Cu}^{mat,meas})^2}{\sum(C_{Cu}^{mat,meas})^2}$$

⑤溶質原子クラスター一体積の寄与分

$$Obj_{V_{clust}} = \frac{\sum(V_{clust}^{pred} - V_{clust}^{meas})^2}{\sum(V_{clust}^{meas})^2}$$

上付添字 *pred*:予測 *meas*:測定値

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

53

2.2.1 遷移温度移行量予測式の検討方針

(2) 目的関数による係数最適化について

- 遷移温度移行量だけでなく、ミクロ組織変化に関する物理量も予測する
 - 遷移温度移行量およびミクロ組織変化に関する物理量の目的関数が設定されることになる
- 最も重要な遷移温度移行量の予測精度が高くなるように目的関数の遷移温度移行量(\bar{A})の寄与を大きくした
 - 目的関数の寄与 $\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$ (スライド53参照)の配分は、どの予測量を重要視するかという方針による。今回の改定では遷移温度移行量(\bar{A})を重視した。
($\bar{A}: \Delta T_{41J}$ がデータベース全データに、 $\bar{B} \sim \bar{E}$ はAPT測定したデータに対し考慮)
- 特定の最適化対象データに対する重み付けはしないこととした
 - 全データに対して均一に最適化するため
- 目的関数に残差平均値(O_g)を取り入れる
 - 最適化に資した照射データ実測値と予測曲線の残差を最小化する
- 遷移温度移行量予測式の係数の最適化とともに、ミクロ組織変化予測式の係数も最適化した

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

54

2.2.1 遷移温度移行量予測式の検討方針

(2) 目的関数による係数最適化について【補足: 残差平均値(O_a)】

$$\text{目的関数 } Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

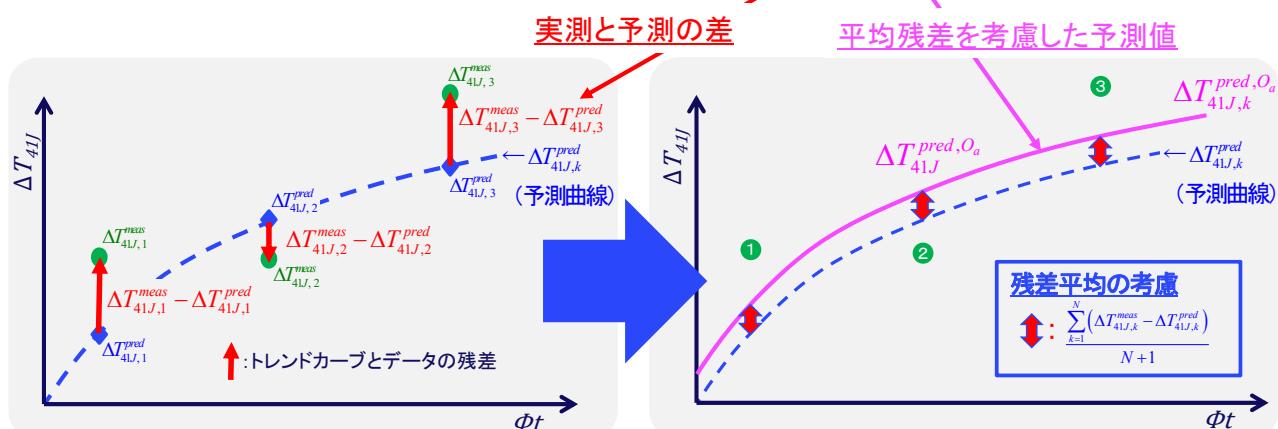
$$\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$$

(1) 遷移温度移行量の寄与分

$$Obj_{\Delta T_{41J}} = \frac{\sum(\Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} - \Delta T_{41J,k}^{meas})^2}{\sum(\Delta T_{41J,k}^{meas})^2}$$

$$\Delta T_{41J,k}^{pred,O_a} = \Delta T_{41J,k}^{pred} + \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta T_{41J,k}^{meas} - \Delta T_{41J,k}^{pred})}{N+1}$$

上付添字
pred: 予測 *meas*: 測定値
Oa: 残差平均の考慮



2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

残差評価: 係数最適化の良し悪しの基準

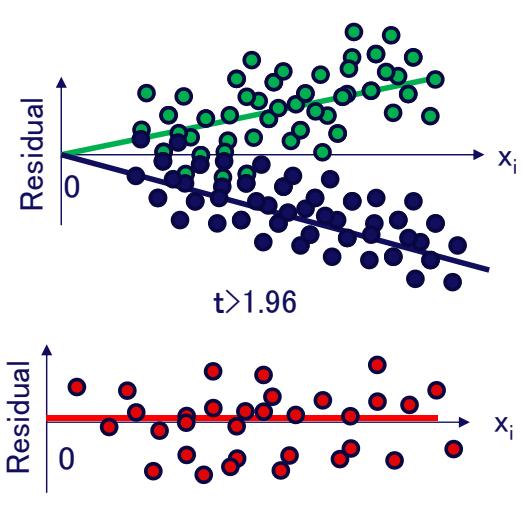
- 残差の標準偏差 σ と平均値 μ を、それぞれの試行で計算

- 良い予測: $\sigma \rightarrow \text{小}$, $\mu \approx 0$
- 良い予測の候補: $|\mu| < 1^\circ\text{C}$, $\sigma < 10.5^\circ\text{C}$

- t検定を用いて、予測残差のパラメータ依存性を評価

- $t < 1.96$: 残差にパラメーター依存性がない
- Σt^2 が最小となるものを候補の中から探す

- ASTM E900-15と同様の手法を採用



2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

試行条件(1/3)

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\boxed{\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1}$$

遷移温度移行量、ミクロ組織予測式両方の係数を最適化

Trial #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{A}	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
\bar{B}	0	0.1	0.033	0	0.05	0.025	0.025	0	0	0
\bar{C}	0	0	0.033	0.033	0.025	0.05	0.025	0.05	0.025	0.025
\bar{D}	0	0	0	0.033	0	0	0	0.025	0.05	0.025
\bar{E}	0	0	0.033	0.033	0.025	0.025	0.05	0.025	0.025	0.05

V_f は C_{sc} と V_{clust} の掛け算, $V_f = C_{sc} \cdot V_{clust}$
 $\bar{B} > 0$ & $\bar{D} = 0$ もしくは $\bar{B} = 0$ & $\bar{D} > 0$ としている

V_f : 溶質原子クラスター体積率
 V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 C_{sc} : 溶質原子クラスターの数密度

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

57

2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

試行条件(2/3)

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\boxed{\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1}$$

遷移温度移行量、ミクロ組織予測式両方の係数を最適化

Trial #	11	12	13	14	15	16	17	18	19
\bar{A}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
\bar{B}	0.2	0.066	0	0.1	0.05	0.05	0	0	0
\bar{C}	0	0.066	0.066	0.05	0.1	0.05	0.1	0.05	0.05
\bar{D}	0	0	0.066	0	0	0	0.05	0.1	0.05
\bar{E}	0	0.066	0.066	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.1

V_f は C_{sc} と V_{clust} の掛け算, $V_f = C_{sc} \cdot V_{clust}$
 $\bar{B} > 0$ & $\bar{D} = 0$ もしくは $\bar{B} = 0$ & $\bar{D} > 0$ としている

V_f : 溶質原子クラスター体積率
 V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 C_{sc} : 溶質原子クラスターの数密度

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

58

2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

試行条件(3/3)

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\boxed{\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1}$$

遷移温度移行量、ミクロ組織予測式両方の係数を最適化

Trial #	20	21	22	23	24	25	26	27	28
\bar{A}	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
\bar{B}	0.3	0.1	0	0.15	0.075	0.075	0	0	0
\bar{C}	0	0.1	0.1	0.075	0.15	0.075	0.15	0.075	0.075
\bar{D}	0	0	0.1	0	0	0	0.075	0.15	0.075
\bar{E}	0	0.1	0.1	0.075	0.075	0.15	0.075	0.075	0.15

V_f は C_{sc} と V_{clust} の掛け算, $V_f = C_{sc} \cdot V_{clust}$
 $\bar{B} > 0$ & $\bar{D} = 0$ もしくは $\bar{B} = 0$ & $\bar{D} > 0$ としている

V_f : 溶質原子クラスター体積率
 V_{clust} : 溶質原子クラスター平均体積
 C_{sc} : 溶質原子クラスターの数密度

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

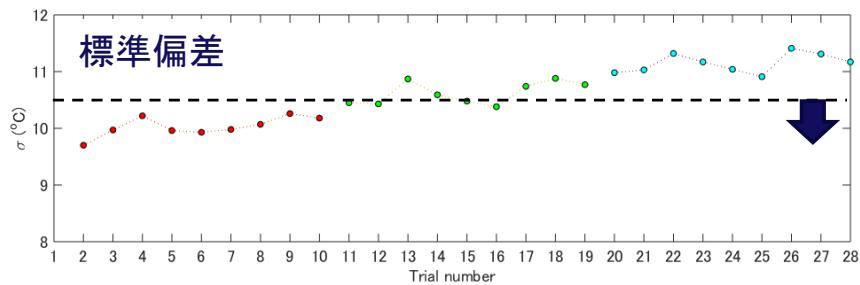
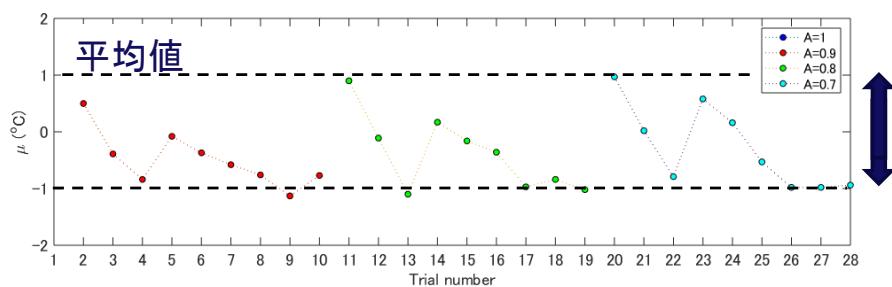
59

2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

改定提案式: 良い予測の候補: $|\mu| < 1$ °C, $\sigma < 10.5$ °C

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$$



→ 候補: Trial 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 15, 16

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

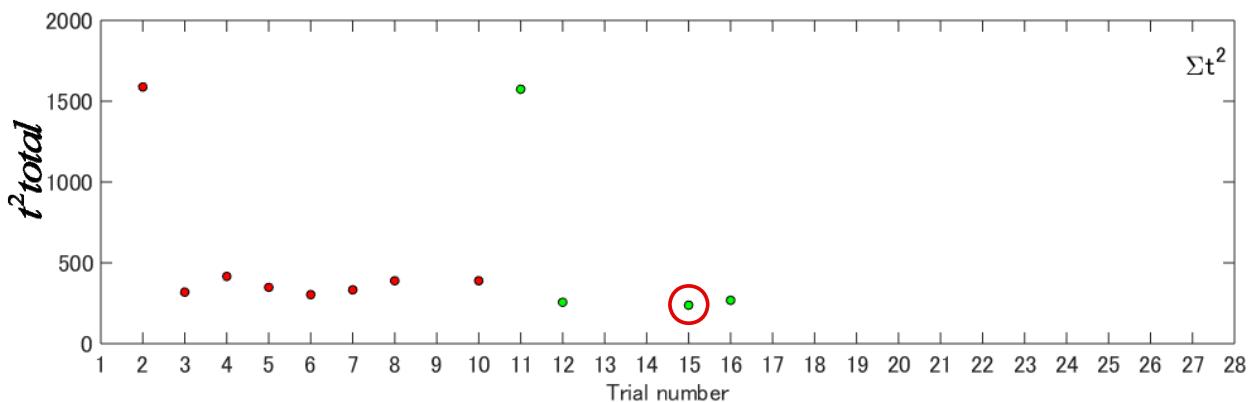
60

2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

改定提案式: Σt^2

$$Obj = \bar{A} \cdot Obj_{\Delta T_{41J}} + \bar{B} \cdot Obj_{V_f} + \bar{C} \cdot Obj_{C_{Cu}^{mat}} + \bar{D} \cdot Obj_{C_{SC}} + \bar{E} \cdot Obj_{V_{clust}} \rightarrow \min$$

$$t^2 total = \sum_i t_{m(x_i)}^2 \quad \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \bar{D} + \bar{E} = 1$$

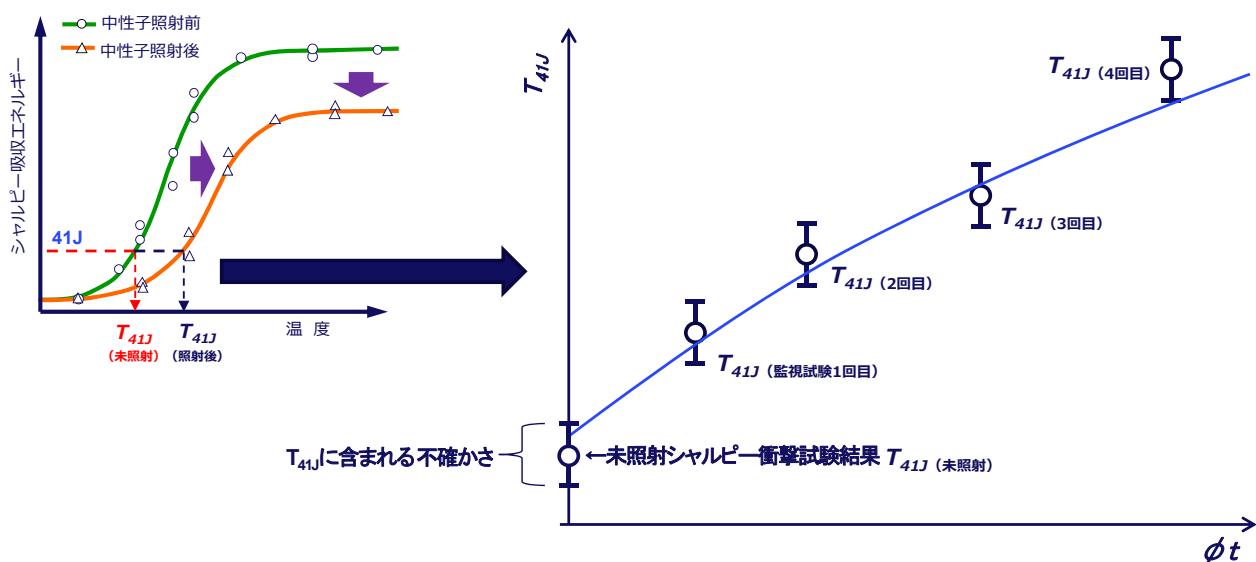


候補: Trial 2,3,4,5,6,7,8,10,11,12,15,16 → 選別したもの 15

Trial 15: A=0.8, B=0.05, C=0.1, D=0, E=0.05

2.2.2 遷移温度移行量予測式の検討

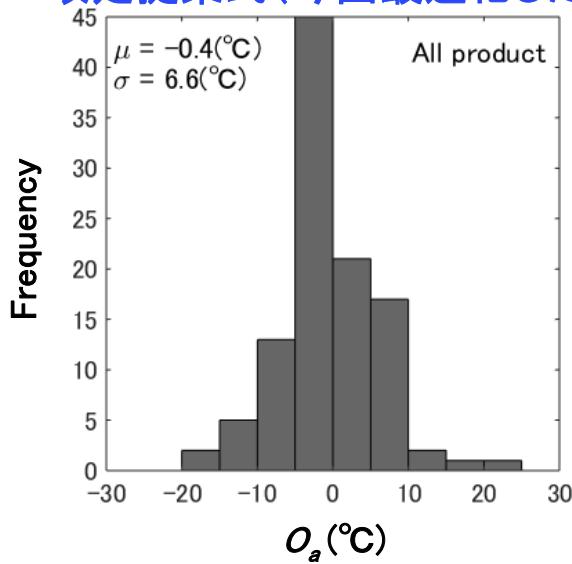
係数の最適化時: 残差平均の考慮 (O_a)



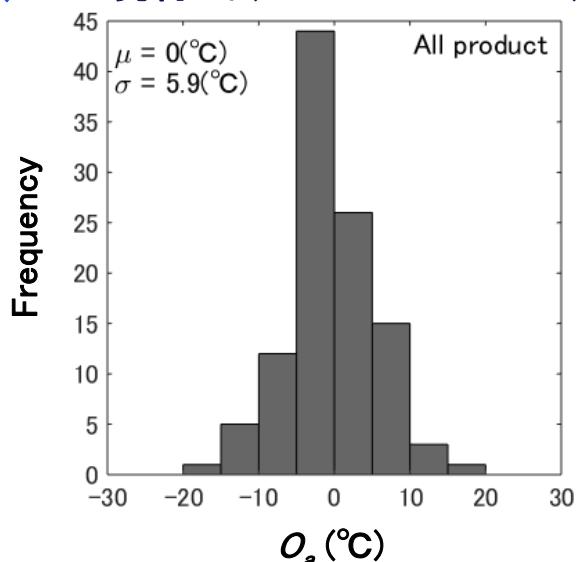
ΔT_{41J} の推移(トレンド)を再現できるように係数最適化

残差平均値の分布(O_a)の分布(結果)

改定提案式(今回最適化した式)



現行式(JEAC4201-2013)



ほぼ同等の分布をしている

3. 照射脆化予測式の改定案(ミクロ組織変化予測式)

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

JEAC4201-2013現行式	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
<u>溶質原子クラスター平均体積</u> $V_{clust} = \xi_{15} f\left(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}\right) \left(1 + \xi_{13} \left(C_{Ni}^0\right)^{\xi_{14}}\right)^2 + \xi_9 \left(1 + \xi_{10} D_{Cu}\right) \phi t$	$V_{Clust} = A + Bt$ <p>係数式</p> $A = \left(\xi_1 C_{Cu}^0 + \xi_2\right) \left(1 + \xi_3 \frac{\phi}{10^{11}}\right) \frac{1 + \frac{\xi_4}{T_{irrad}}}{1 + \frac{288}{\xi_4}}, \quad B = \left(\xi_5 + \xi_6 C_{Si}^0\right) \frac{\phi}{10^{19}} + \frac{\xi_7 \left(C_{Ni}^0 + \xi_8\right)}{C_{Cu}^0 + \xi_9} \frac{1}{10^9}$
<u>マトリックスCu濃度</u> $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC}$	$C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh}$ <p>係数式</p> $\delta_1 = d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{\left(C_{Cu}^0\right)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \times \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\}$

⇒式中の記号については、スライド67参照

3. 照射脆化予測式の改定案(ミクロ組織変化予測式)

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

JEAC4201-2013現行式	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
照射誘起クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \xi_3 \cdot ((C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2) \cdot C_{MD}$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$ <p style="color: blue;">係数式</p> $\alpha_1 = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^0 \right)$ $\gamma_1 = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right)$
MD(マトリックス損傷)数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_T^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni})^2 \cdot \varphi - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$	$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_1 t))$ <p style="color: blue;">係数式</p> <p>照射誘起クラスター数密度の 係数式α_1及びγ_1と同一</p>

⇒式中の記号については、スライド67参照

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

65

3. 照射脆化予測式の改定案(ミクロ組織変化予測式)

鋼材の化学組成(Cu,Ni,Si,Mn)、照射温度および中性子束を入力パラメータとして、
ミクロ組織変化に関する物理量を照射時間の関数として扱う。(※照射量=中性子束×照射時間)

JEAC4201-2013現行式	改定提案式 (ミクロ組織変化予測近似式)
照射促進クラスター数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0))^2$ $D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$	$C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3 \beta_4 t + 1} \right)$ <p style="color: blue;">係数式</p> $\beta_4 = \begin{cases} \frac{C_{Cu}^0 - \beta_2}{\delta_1}, & C_{Cu}^0 - \beta_2 > 0 \\ 0, & C_{Cu}^0 - \beta_2 \leq 0 \end{cases} \quad \beta_3 = \beta_1 (\delta_1)^2$ $\beta_1 = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\}$ $\times \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right)$
溶質原子クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$	$V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

⇒式中の記号については、スライド67参照

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

66

3. 照射脆化予測式の改定案

改定提案式の記号と名称

記号	データベースでの平均値	名称(単位)
ϕt	—	照射量 (n/cm ² , E>1MeV)
ϕ	ϕ^{mean}	中性子束 (n/(cm ² ·s), E>1MeV)
t	—	照射時間(s)
C_{Cu}^0	$C_{Cu}^{0,mean}$	鋼材のCu濃度 (wt. %)
C_{Ni}^0	$C_{Ni}^{0,mean}$	鋼材のNi濃度 (wt. %)
C_{Si}^0	$C_{Si}^{0,mean}$	鋼材のSi濃度 (wt. %)
C_{Mn}^0	$C_{Mn}^{0,mean}$	鋼材のMn濃度 (wt. %)
T_{irrad}	T_{irrad}^{mean}	照射温度(°C)

記号	名称(単位)
V_f	溶質原子クラスタ一体積率(—)
V_{clust}	溶質原子クラスター平均体積(nm ³)
C_{sc}^{ind}	照射誘起クラスターの数密度 (m ⁻³)
C_{sc}^{enh}	照射促進クラスターの数密度 (m ⁻³)
C_{MD}	マトリックス損傷の数密度(MD) (m ⁻³)
C_{Cu}^{mat}	鋼材のマトリックス中に固溶しているCu濃度 (マトリックスCu濃度) (wt. %)

最適化により決定した係数

記号	名称
a_i ($i=1 \sim 14$)	溶質原子クラスターの数密度に関する係数
b_j ($j=1 \sim 5$)	マトリックス損傷の数密度に関する係数
d_k ($k=1 \sim 10$)	マトリックスCu濃度に関する係数
ξ_l ($l=1 \sim 9$)	溶質原子クラスタ一体積に関する係数
$C_1 C_2$	降伏応力の増加に関する溶質原子クラスターとマトリックス損傷の寄与を示す係数

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

67

3. 照射脆化予測式の改定案(遷移温度移行量予測式)

遷移温度移行量

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

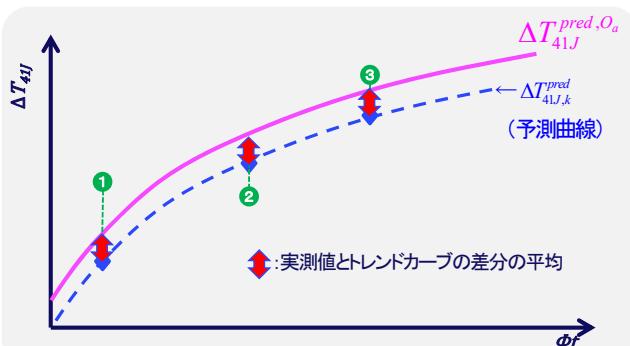
$$\Delta \sigma_y = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$

改定提案式(ミクロ組織変化予測式)により導出

$\Delta \sigma_y$: 照射欠陥((溶質原子クラスターとマトリックス損傷))による降伏応力上昇分
 α : 比例係数($\alpha = 0.6$)
 V_f : 溶質原子クラスタ一体積率
 C_{MD} : マトリックス損傷の数密度(MD)

オフセットの採用(データ評価)

監視試験データ実測値と改定提案式によるトレンドカーブの差分平均値(オフセット)を考慮することで、脆化傾向の再現性を改善

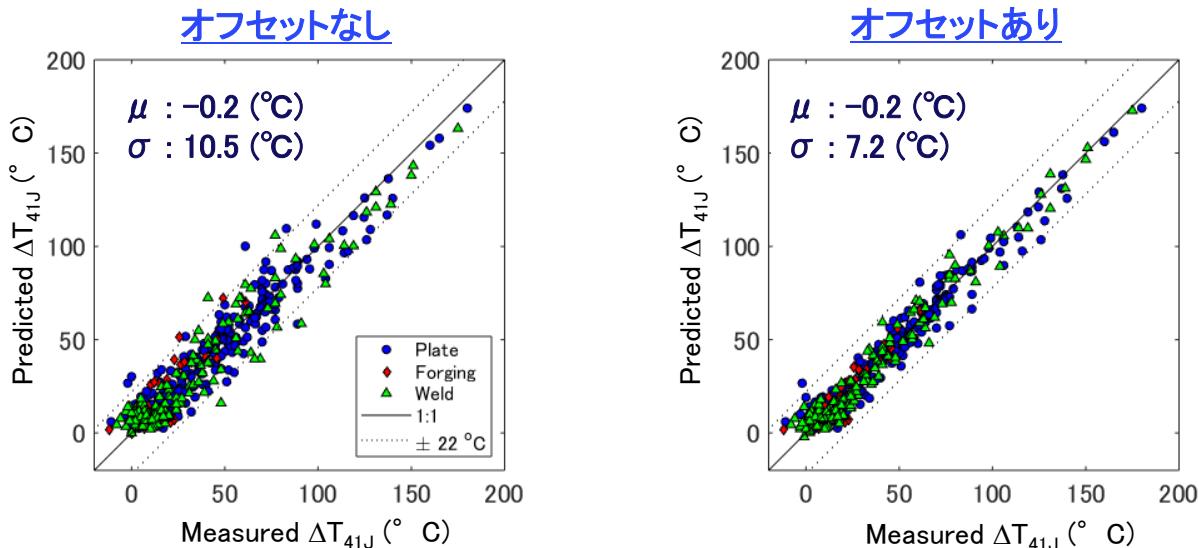


Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

68

3. 照射脆化予測式の改定案

ΔT_{41J} 予測結果



予測残差(予測式から実測値を差し引いたもの)の平均値(μ)はほぼ $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ であり、極端なバイアスがかかるっていない。

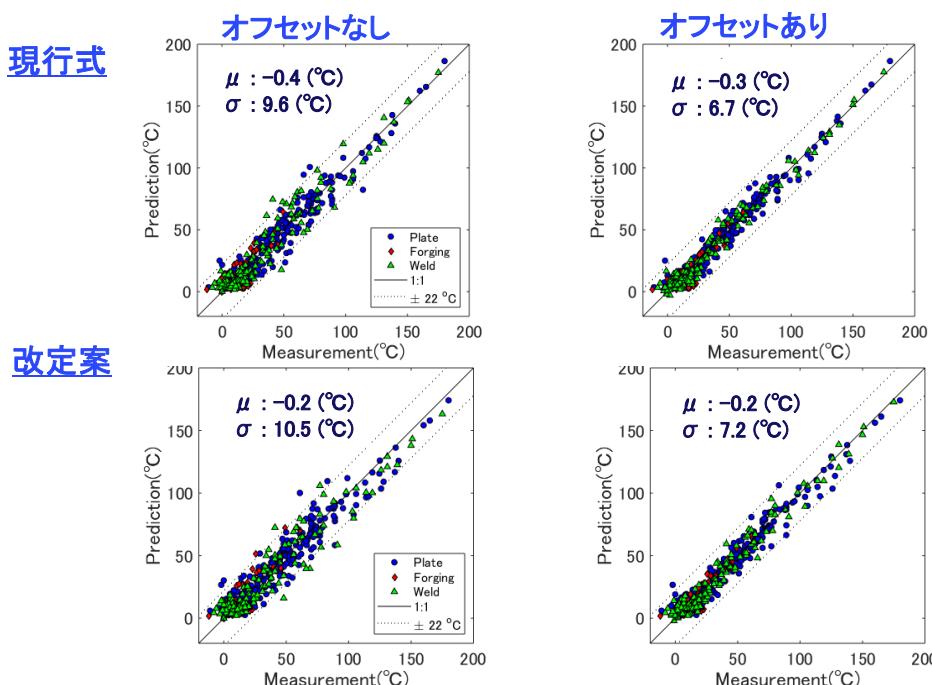
オフセットにより予測残差の標準偏差(σ)が改善

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

69

3. 照射脆化予測式の改定案(遷移温度移行量の実測と予測)

JEAC4201-2013現行式と改定案の比較(遷移温度移行量, 鋼種別)



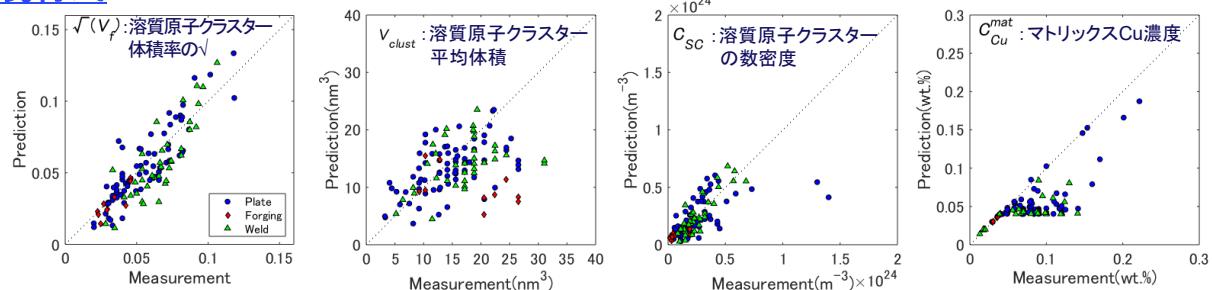
現行式とほぼ同等の予測が可能

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

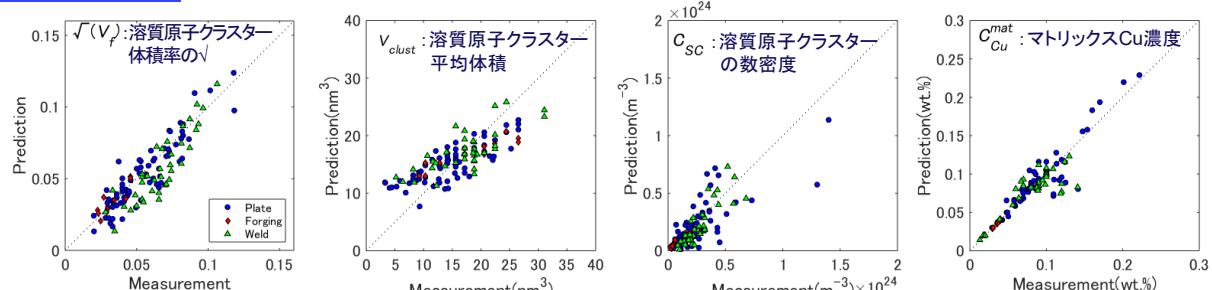
70

JEAC4201-2013現行式と改定提案式の比較(ミクロ組織変化)

現行式



改定提案式



改定提案式のミクロ組織変化予測性能は現行式よりも改善

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

71

4. まとめ(1/3)

照射脆化予測式を改定は以下の方針とした

- ✓ ミクロ組織変化予測→遷移温度移行量予測の枠組みは変えずに、それぞれの式を改良する
- ✓ ミクロ組織変化予測式の開発
「溶質原子クラスター体積率」に加え、国内照射材を対象としたアトムプローブ測定で蓄積したデータとして定量的な評価が可能となってきた「溶質原子クラスター平均体積」、「溶質原子クラスターの数密度」、「鋼材のマトリックス中に固溶しているCu濃度(マトリックスCu濃度)」を予測式に反映する
- ✓ 遷移温度移行量予測の開発
国内照射材のアトムプローブ測定で得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定する
- ✓ JEAC4201-2013の現行式策定で考慮したデータへの重み付けを採用しない

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

72

ミクロ組織変化予測式の検討は、

- アトムプローブで測定されるものを「溶質原子クラスター」として、照射促進クラスターと照射誘起クラスターを脆化要因として考慮した
- アトムプローブで測定できないものの総称を「マトリックス損傷」とし、その数密度(C_{MD})を脆化の第二要因として考慮した
- 照射により形成されたマトリックス損傷MDが、照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方を取り入れた

遷移温度移行量予測式の検討は、

- 遷移温度移行量が照射硬化量に比例する線形モデルに従うとした
- 照射により形成される溶質原子クラスター(SC)とマトリックス損傷(MD)のみが障害物となるとし、その 2 乗和平方根として定式化した
- 現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry. All Right Reserved.

73

策定した改定提案式は、

- **遷移温度移行量(ΔT_{41J})の予測性能は現行と同等**
JEAC4201-2013の現行式で考慮していたデータの重み付けをなしとして開発し、ほぼ同等の予測が可能であることを確認した。
- **ミクロ組織変化の予測性能が向上**
JEAC4201-2013現行式の開発ベースとなった「溶質原子クラスタ一体積率」を再現するとともに、国内照射材を対象としたアトムプローブ測定データの蓄積にて、より定量的評価が可能となった「溶質原子クラスター平均体積」、「溶質原子クラスターの数密度」、「鋼材のマトリックス中に固溶しているCu濃度」の予測性能が改善した。
- **実測値と予測曲線の差分平均値(オフセット)の考慮は有効**
実測値(実機プラント、照射試験等のデータセット)と予測曲線の差分平均値(オフセット)を考慮することで、予測曲線による脆化傾向の再現性を改善できることを確認した。なお、プラント個別評価におけるオフセットを含めたマージン等の運用については、今後規格策定期階で具体的な運用方法を検討する方針とする。(日本電気協会 破壊靭性検討会)

JEAC4201規格改定提案にあたっては、本委員会で報告した検討の前提条件、検討プロセスを踏まえ、改定式の更なる最適化についても検討を進める方針である(例:係数削減等)。

74

APPENDIX A ミクロ組織変化予測式 (改定提案式(近似式)の微分方程式からの導出)

ミクロ組織変化項の近似

関連項 2.1.4項

《見直した微分式》

$$V_{clust} = (\zeta_1 C_{Cu}^0 + \zeta_2) \left(1 + \zeta_3 \frac{\phi}{10^{11}} \right) \frac{(1 + \frac{\zeta_4}{T})}{(1 + \frac{\zeta_4}{288})} + (\zeta_5 + \zeta_6 C_{Si}^0) \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{(C_{Cu}^0 + \zeta_9)} \frac{t}{10^9}$$

照射誘起クラスターの数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$

照射促進クラスターの数密度 $\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_S^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_M^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_N^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left\{ 1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right\}^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$

MD(マトリックス損傷)の数密度 $\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_N^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$

マトリックスCu濃度 $\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_3 \left(\frac{\phi^{d_5}}{\phi^{mean}} \right)^{d_6} \right\} \left\{ 1 + d_4 \left(\frac{T_{irrad}^{d_7}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_8} \right\} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t}$

クラスター体積率 $V_f = V_{clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$

①マトリックス中のCu濃度 C_{Cu}^{mat} はバルクCu濃度 C_{Cu}^0 に比例として近似 $C_{Cu}^{mat} \propto C_{Cu}^0$

②マトリックスCuの消費 C_{SC} は、照射促進クラスターで主に生じる C_{SC}^{enh} として近似 $C_{SC} \approx C_{SC}^{enh}$

①②に基づく近似式

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved APPENDIX A

75

ミクロ組織変化予測式(近似式の微分方程式からの導出)

1.定数のまとめ: 入力変数や係数をまとめて定数として置き換え

照射誘起クラスター

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD} \rightarrow \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD} \rightarrow \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \alpha_1 C_{MD} \quad ①$$

$C_{Cu}^{mat} \propto C_{Cu}^0$ 入力変数 C_{Cu}^0 , ϕ^{mean} と係数 $a_1 \sim a_4$ の項をまとめて定数 α_1

照射促進クラスター

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left\{ 1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right\}^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$$

マトリックス損傷(MD)の数密度

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \gamma_1 - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \quad ③$$

$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \beta_1 (C_{Cu}^{mat} - \beta_2)^2$ ②

マトリックスCu濃度

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -\delta_1 \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \quad ④$$

【初期条件】 $C_{SC}^{ind}(t=0)=0$, $C_{SC}^{enh}(t=0)=0$, $C_{MD}(t=0)=0$, $C_{Cu}^{mat}(t=0)=C_{Cu}^0$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved APPENDIX A

76

2.求積

マトリックスCu濃度

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -\delta_1 \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \quad ④ \text{より} \quad C_{Cu}^{mat} = -C_{Cu}^{mat}(t=0) - \delta_1 \{C_{SC}^{enh} + C_{SC}^{ind}(t=0)\} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh} \quad ⑤$$

マトリックス損傷(MD)の数密度

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \gamma_1 - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \quad ③ \text{より} \quad C_{MD} = -C_{MD}(t=0) + \gamma_1 t - C_{SC}^{ind}(t=0) = \gamma_1 t - C_{SC}^{ind} \quad ⑥$$

照射促進クラスター

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \beta_1 (C_{Cu}^{mat} - \beta_2)^2 \quad ② \text{に} ⑤ \text{を代入}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} &= \beta_1 (C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh} - \beta_2)^2 = \beta_1 (\delta_1)^2 \left(C_{SC}^{enh} - \frac{C_{Cu}^0 - \beta_2}{\delta_1} \right)^2 \quad \text{ここで、 } \beta_3 = \beta_1 (\delta_1)^2 \quad \beta_4 = \frac{C_{Cu}^0 - \beta_2}{\delta_1} \\ &= \beta_3 (C_{SC}^{enh} - \beta_4)^2 \\ \frac{1}{(C_{SC}^{enh} - \beta_4)^2} \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} &= \beta_3 \\ \frac{1}{(C_{SC}^{enh} - \beta_4)} &= -\beta_3 t + C_1 \\ \text{初期条件より、} \quad \frac{1}{(C_{SC}^{enh}(t=0) - \beta_4)} &= -\frac{1}{\beta_4} = C_1 \\ \frac{1}{(C_{SC}^{enh} - \beta_4)} &= -\beta_3 t - \frac{1}{\beta_4} \\ C_{SC}^{enh} - \beta_4 &= -\frac{\beta_4}{1 + \beta_3 \beta_4 t} \\ C_{SC}^{enh} &= \beta_4 \left(1 - \frac{1}{1 + \beta_3 \beta_4 t} \right) \quad ⑦ \end{aligned}$$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved

APPENDIX A 77

照射誘起クラスター

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \alpha_1 C_{MD} \quad \cdots ① \text{に} ⑤ \quad C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh} \text{ を代入}$$

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = \alpha_1 (\gamma_1 t - C_{SC}^{ind})$$

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} + \alpha_1 C_{SC}^{ind} = \alpha_1 \gamma_1 t$$

$$C_{SC}^{ind} = C_2 e^{-\alpha_1 t} + \gamma_1 t - \frac{\gamma_1}{\alpha_1}$$

$$\text{初期条件より、 } C_2 = \frac{\gamma_1}{\alpha_1}$$

MD(マトリックス損傷)の数密度

$$C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t + \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (e^{-\alpha_1 t} - 1) \quad ⑧$$

⑧に⑥ $C_{MD} = \gamma_1 t - C_{SC}^{ind}$ を代入

$$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} (1 - e^{-\alpha_1 t}) \quad ⑨$$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved

APPENDIX A

78

【近似式と係数】

マトリックスCu濃度

$$C_{Cu}^{mat} = C_{Cu}^0 - \delta_1 C_{SC}^{enh}$$

$$\delta_1 = d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{\left(C_{Cu}^0 \right)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\}$$

照射促進クラスターの数密度

$$C_{SC}^{enh} = \beta_4 \left(1 - \frac{1}{1 + \beta_3 \beta_4 t} \right)$$

$$\beta_3 = \beta_1 (\delta_1)^2 \quad \beta_4 = \begin{cases} \frac{C_{Cu}^0 - \beta_2}{\delta_1}, & C_{Cu}^0 - \beta_2 > 0 \\ 0, & C_{Cu}^0 - \beta_2 \leq 0 \end{cases} \quad \beta_2 = a_{14}$$

$$\beta_1 = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left\{ 1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right\}^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right)$$

照射誘起クラスターの数密度

$$C_{SC}^{ind} = \gamma_1 t + \frac{\gamma_1}{\alpha_1} \left(e^{-\alpha_1 t} - 1 \right) \quad \alpha_1 = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} \left(1 + a_4 C_{Cu}^0 \right)$$

MD(マトリックス損傷)の数密度

$$C_{MD} = \frac{\gamma_1}{\alpha_1} \left(1 - e^{-\alpha_1 t} \right)$$

$$\gamma_1 = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right)$$

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved APPENDIX A 79

ミクロ組織変化予測式(定式化した近似式)

【近似式と係数】

$$\text{溶質原子クラスター体積率 } V_f = V_{Clust} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$

Φ [n/cm²·s] : 中性子束
 Φt [n/cm²] : 照射量

T_{irrad} [°C] : 照射温度
 t [s] : 照射時間

溶質原子クラスター平均体積 式の入力変数(化学成分、中性子束、時間、照射温度)と係数ζをまとめると

$$V_{Clust} = \frac{\pi \cdot d_g^3}{6} = (\zeta_1 \cdot C_{Cu}^0 + \zeta_2) \cdot \left(1 + \zeta_3 \cdot \frac{\phi}{10^{11}} \right) \cdot \left(\frac{1 + \frac{\zeta_4}{T_{irrad}}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}} \right) + (\zeta_5 + \zeta_6 \cdot C_{Si}^0) \cdot \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 \cdot (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \cdot \frac{t}{10^9}$$

↓

係数式A 係数式B

近似式

$$V_{Clust} = A + Bt$$

$$A = \frac{\pi \cdot d_g^3}{6} = (\zeta_1 \cdot C_{Cu}^0 + \zeta_2) \cdot \left(1 + \zeta_3 \cdot \frac{\phi}{10^{11}} \right) \cdot \left(\frac{1 + \frac{\zeta_4}{T_{irrad}}}{1 + \frac{\zeta_4}{288}} \right)$$

$$B = (\zeta_5 + \zeta_6 \cdot C_{Si}^0) \cdot \frac{\phi t}{10^{19}} + \frac{\zeta_7 \cdot (C_{Ni}^0 + \zeta_8)}{C_{Cu}^0 + \zeta_9} \cdot \frac{t}{10^9}$$

溶質原子クラスター体積率は定式化前後で同じ(微分方程式の求積等はなし)

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved

APPENDIX B 転位運動の障害物モデル (線形モデル/非線形モデルについて)

■ 今回の改定提案では線形モデルを採用

- 初期降伏応力の影響を考慮した非線形モデルの方がより良い予測を与える可能性があるが、
- 非線形モデルでは、以下の課題が残るため、その採用は時期尚早と判断した。
 - ✓ 式に含まれる初期降伏応力のうちの非線形成分 σ_{NL} の機構論的背景が必ずしも明確では無い。
 - ✓ σ_{NL} は炉ごと・ヒートごとに最適化される係数の一つとして取り扱われ、照射脆化データの無いプラントに対し σ_{NL} の見積もりが困難である。

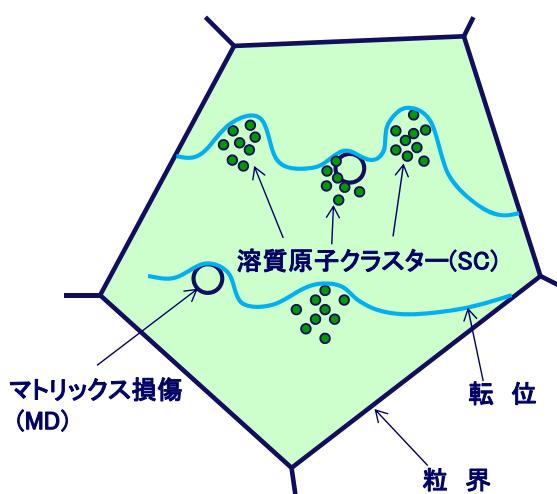
非線形モデルは今後の検討課題

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved APPENDIX B

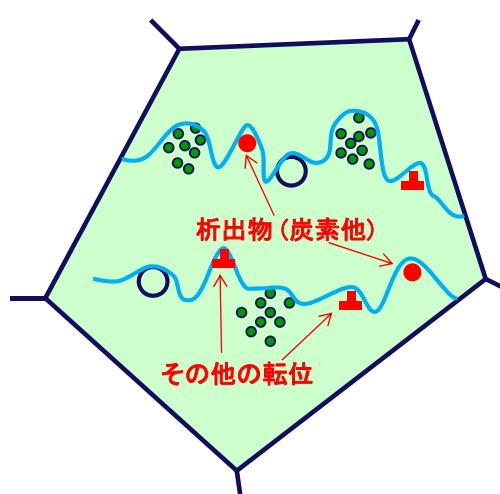
81

転位運動の障害物モデル

線形モデル



非線形モデル(参考)



転位の運動の障害物

- 照射により形成される溶質原子クラスター(SC)とマトリックス損傷(MD)のみが障害物となる

転位の運動の障害物

- 初期状態で存在する炭素他の析出物や、その他の転位(初期降伏応力をもたらす要因)も障害物となる

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved APPENDIX B

82

今回採用

■ 初期降伏応力の照射脆化への影響を考慮しないモデル(線形モデル)

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_y &= \{(\sigma_y^0 + \sigma_{ID}) - \sigma_y^0\} \\ &= \sigma_{ID} \\ &= \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}\end{aligned}$$

σ_y^0 : 初期降伏応力

σ_{ID} : 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)の寄与による降伏応力上昇量

$$\sigma_{ID} = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$

V_f : 溶質原子クラスター体積率

C_{MD} : マトリックス損傷の数密度(MD)

■ 初期降伏応力の照射脆化への影響を考慮したモデル(非線形モデル)

$$\Delta T_{41J} = \alpha \Delta \sigma_y$$

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_y &= \left\{ \left(\sqrt{(\sigma_{NL})^2 + (\sigma_{ID})^2} + \sigma_L \right) - (\sigma_{NL} + \sigma_L) \right\} \\ &= \left\{ \sqrt{(\sigma_{NL})^2 + (\sigma_{ID})^2} - \sigma_{NL} \right\}\end{aligned}$$

σ_{ID} : 照射欠陥(溶質原子クラスターとマトリックス損傷)の寄与による降伏応力上昇量

$$\sigma_{ID} = \sqrt{\left(C_1 \sqrt{V_f}\right)^2 + \left(C_2 \sqrt{C_{MD}}\right)^2}$$

σ_L : 初期降伏応力に線形的に寄与する硬化因子(線形成分)

σ_{NL} : 初期降伏応力に非線形的に寄与する硬化因子(非線形成分)

Copyright ©2020 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved

APPENDIX B

83



微分方程式形式のミクロ組織変化予測式 による遷移温度移行量の予測結果

(一財)電力中央研究所

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

目 次



背景と目的

C40積分による遷移温度移行量の評価

《1》①C40積分とJEAC4201-2013現行式の比較

《2》①C40積分と②C40近似式の比較※

- ◆ 遷移温度移行量とミクロ組織変化の比較
- ◆ ②C40近似の①C40積分との差異について

まとめ

APPENDIX 係数の最適化に使用したデータベースについて

注※：本付録の検討に用いた監視試験及びAPT測定データのデータベースは、日本電気協会 破壊靱性検討会でJEAC4201の改定検討の際に見直されたデータベース（具体的な見直し内容はAPPENDIX参照）であり、本付録の評価結果は報告書本文や他付録の結果と直接比較することはできません。

□ IET小委員会の経緯

➢ ミクロ組織変化予測式（式①と②で評価）

「微分方程式形式の見直し式」（係数40：「①C40積分」と略記）を提案し、照射脆化メカニズムに関する現状知見を踏まえ専門家のご意見を頂き、次ステップとしてC40積分を連立し近似的に解いて定式化した近似式（②C40近似）を提案。

➢ 遷移温度移行量予測式（式②で評価）

①C40積分はミクロ組織変化の再現性を確認し次の②C40近似の検討に進み、遷移温度移行量の評価は②C40近似のみで実施のため、①C40積分による遷移温度移行量の評価は未実施。

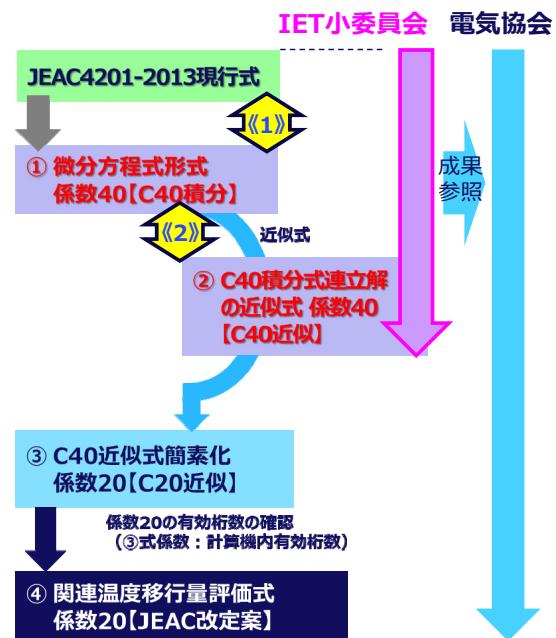
遷移温度移行量予測式の検討方針（IET）

- 線形モデルの採用
照射により形成される溶質原子クラスターとマトリックス損傷のみが障害物となるとし、その2乗和平方根として定式化
- 現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しない
(今後の中長期研究課題としてご意見を頂いた)
- ☞ 遷移温度移行量の評価（係数40近似式で継続）
次プロセスでC40積分を連立し近似的に解き定式化した近似式（C40近似）を提案、評価を実施

目的：C40積分による遷移温度移行量の評価※

『1』①C40積分とJEAC4201-2013現行式の比較

『2』①C40積分と②C40近似式の比較



注記：本付録の検討に用いた監視試験及びAPT測定データのデータベースは、日本電気協会 破壊靭性検討会でJEAC4201の改定検討の際に見直されたデータベース（具体的な見直し内容はAPPENDIX 参照）であり、本付録の評価結果は報告書本文や他付録の結果と直接比較することはできません。

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

3

『1』C40積分による遷移温度移行量の評価

『1』①C40積分とJEAC4201-2013現行式の比較

評価式の見直し検討の経緯

JEAC4201-2013現行式

① 微分方程式形式 係数40[C40積分]

IET小委員会 電気協会

成果参考

JEAC4201の改定経緯

JEAC4201-2007 [2013年追補版] 【脆化予測法Rev.2】(現行式)

脆化予測法Rev.2の見直し（電中研） 【脆化予測法見直し式①②】

- 接種協会 IET小委員会①②
導出プロセスや検証プロセスの的確性の議論
- JEA 破壊靭性検討会 (②)
規格ユーザ利便性の向上 (③)
式の簡素化、係数削減の検討
- 性能評価、JEAC4201導入検討 (③)
予測残差に対するパラメータ依存性
実機監視試験データを用いた補正
予測の不確実さを考慮したマージン等の検討
- 第三者による係数最適化プロセスの検証 (③)

JEAC4201改定時の導入案

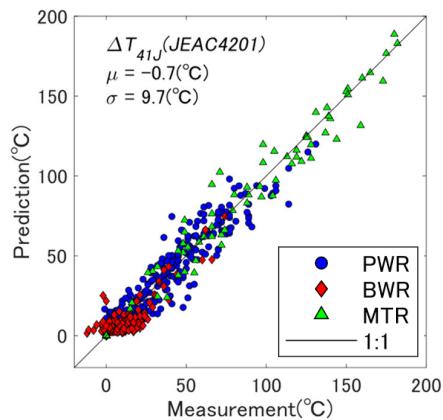
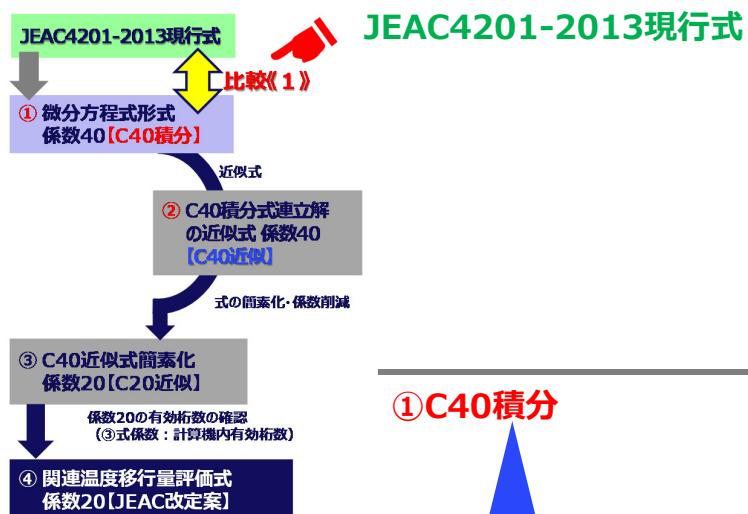
□ JEA 破壊靭性検討会 【関連温度移行量評価式④】

JEAC4201改定の審議中 (JEA) 規格委員会／構造分科会／破壊靭性検討会

③ C40近似式簡素化 係数20[C20近似]

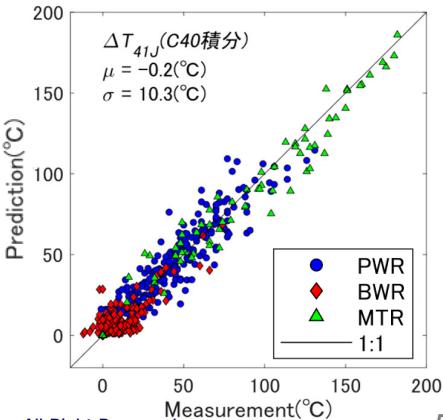
係数20の有効桁数の確認
(③式係数：計算機内有効桁数)

④ 関連温度移行量評価式 係数20[JEAC改定案]



①C40積分

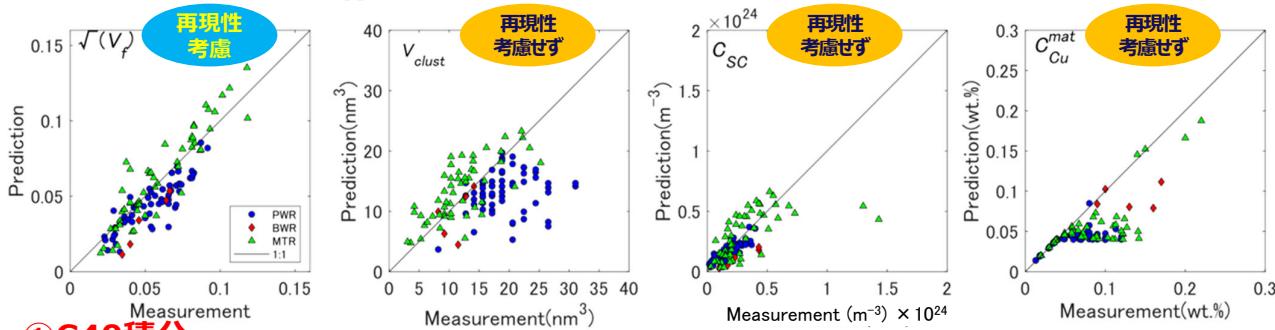
①式は現行式で考慮したデータに対する
EFPY²の重み付けを無しとしたものの、
遷移温度移行量の再現性は確保
(更にミクロ組織変化の再現性向上：次スライド参照)



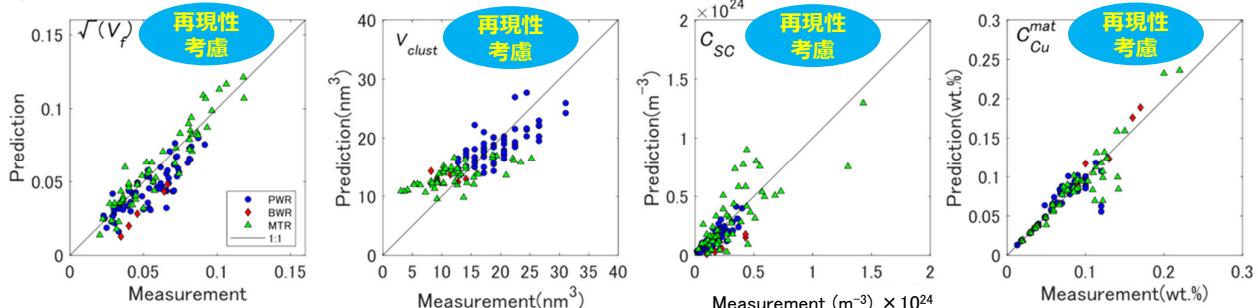
Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

5

JEAC4201-2013現行式



①C40積分



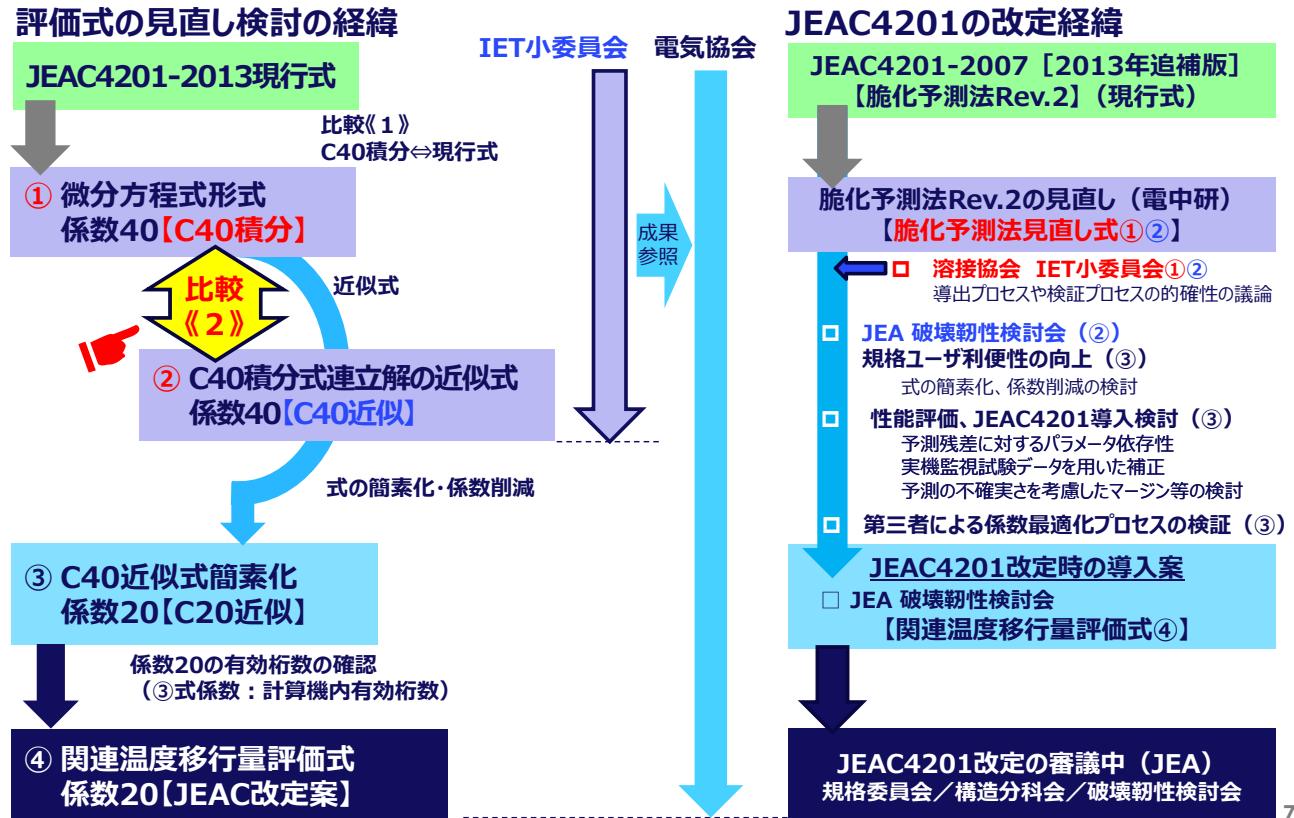
ミクロ組織変化の再現性は向上：現時点のデータベースに基づく技術知見として着目した「 $\sqrt{V_f}$ と ΔT_{41J} の線形の相関」に関連し、溶質原子クラスター体積率 V_f 、平均体積 V_{clust} 、数密度 C_{sc} 、マトリックスCu(C_{Cu}^{mat})の再現性は改善

6

《2》①C40積分と②C40近似式の比較

①C40積分と②C40近似式の比較

評価式の見直し検討の経緯



7

《2》①C40積分と②C40近似式の比較

◆ IET小委における①C40積分と②C40近似式の係数（付録3）

定式が微分方程式形式の「①C40積分」と、それが近似式形式の「②C40近似」とも、その係数は40個であり、この係数セットは共通の目的関数、共通のデータベースを適用して、それぞれの定式で最適化、ミクロ組織変化の再現性等を評価した。

①C40積分で最適化した係数（積分式係数）

②C40近似で最適化した係数（近似式係数）

よって①式と②式の係数をそれぞれ比較すると係数値は異なる。

◆ 本評価（付録4）の①C40積分と②C40近似式の係数の設定

本評価では、①微分方程式形式と②近似式形式の定式の差異を比較するため、付録3とは異なり、①式の積分係数を②式に適用し、共通の係数で計算結果を比較した。

①C40積分で最適化した係数（積分式係数）

②C40近似に積分式係数を適用

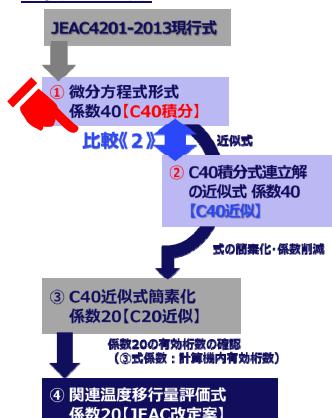
《2》①C40積分と②C40近似式の比較

近似式②に①積分式係数を適用し比較（同一係数比較）

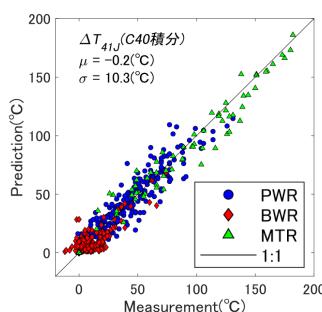


遷移溫度移行量

評価式の変遷

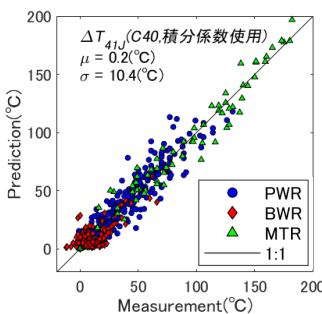


評価式の枠組み

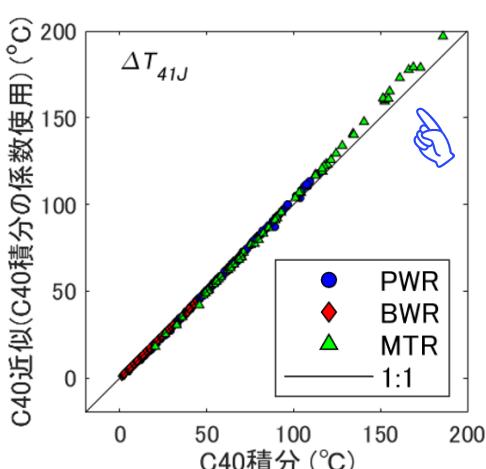


②C40近似（積分式係数使用）

(①と同じ係数)



①C40積分と②C40近似の計算値比較



MTR▲データ（）で、
②C40近似（積分式係数使用）がやや高めに評価する傾向となるが、概ね1対1であり、
近似式は微分方程式形式の評価をよく再現している

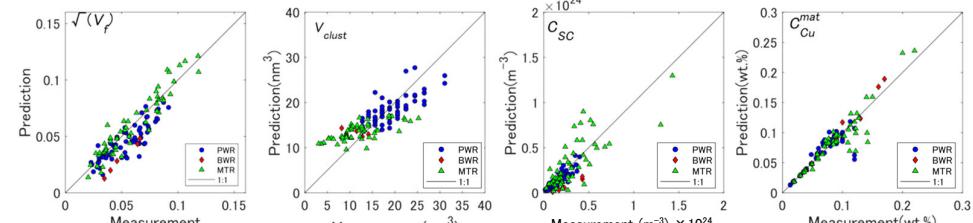
《2》①C40積分と②C40近似式の比較

近似式②に①積分式係数を適用し比較（同一係数比較）



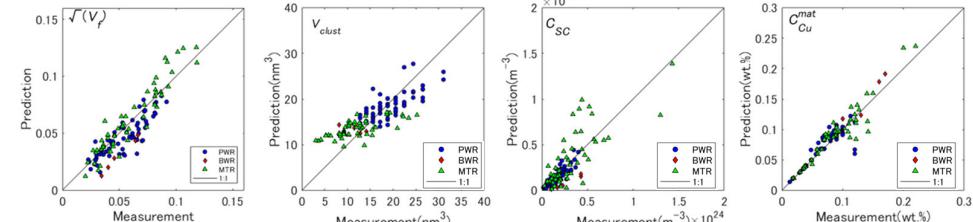
ミクロ組織変化

① C40 積分

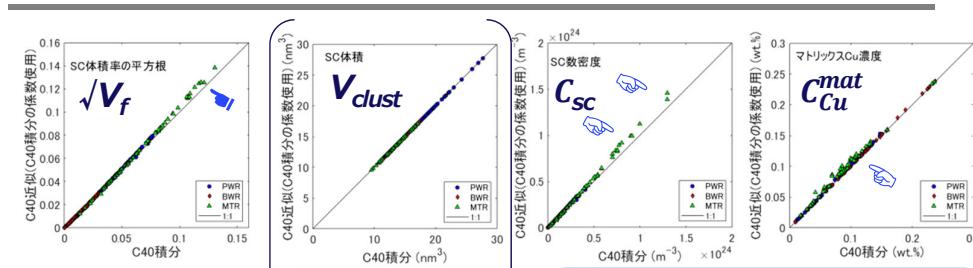


②C40近似 〔積分式係数使用〕

①と同じ係数



①と②の比較



✓ V_f の再現性は「遷移温度移行量」と同様の傾向で、近似式は微分方程式形式の評価をよく再現

【参考】
 V_{clust} の予測式は微分方程式形式ではないため1対1

微分方程式の求解の過程で近似を行なった C_{sc} と c_{mat} ではやや近似式が高めの評価となる。(一)

◆ ASTM E900-15※と同様の手法を採用

◆ パラメータ x_j に対する ΔT_{41J} の①式と②式の計算値の差で評価

$$\Delta T_{41J}^{\text{①C40積分}} - \Delta T_{41J}^{\text{②C40近似、積分係数使用}}$$

$$= Y_j^{\text{①C40積分}} - Y_j^{\text{②C40近似、積分係数使用}} = m_{x_i} x_i + b_{x_i}$$

$Y_j: \text{target}(\Delta T_{41J})$

$x_j: \text{variable}(\Phi t, \Phi, T_{irrad}, C_{Cu}^0, C_{Ni}^0, C_{Si}^0, C_{Mn}^0, C_P, \Delta T_{41J}^{\text{pred}})$

係数の最適化に使用したデータベース情報

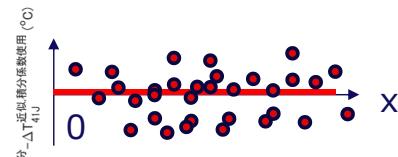
Φt : 中性子照射量

ΔT_{41J} : 遷移温度移行量

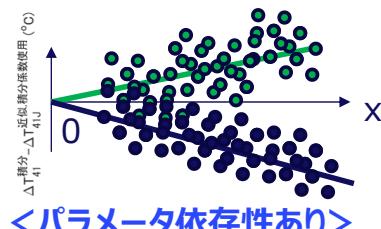
Φ : 中性子束

T_{irrad} : 照射温度

C_X^0 : 鋼材中の化学成分Xの含有量



<パラメータ依存性なし>



<パラメータ依存性あり>

※: ADJE090015-EA

Adjunct for E900-15 Technical Basis for the Equation Used to Predict Radiation-Induced Transition Temperature Shift in Reactor Vessel Materials

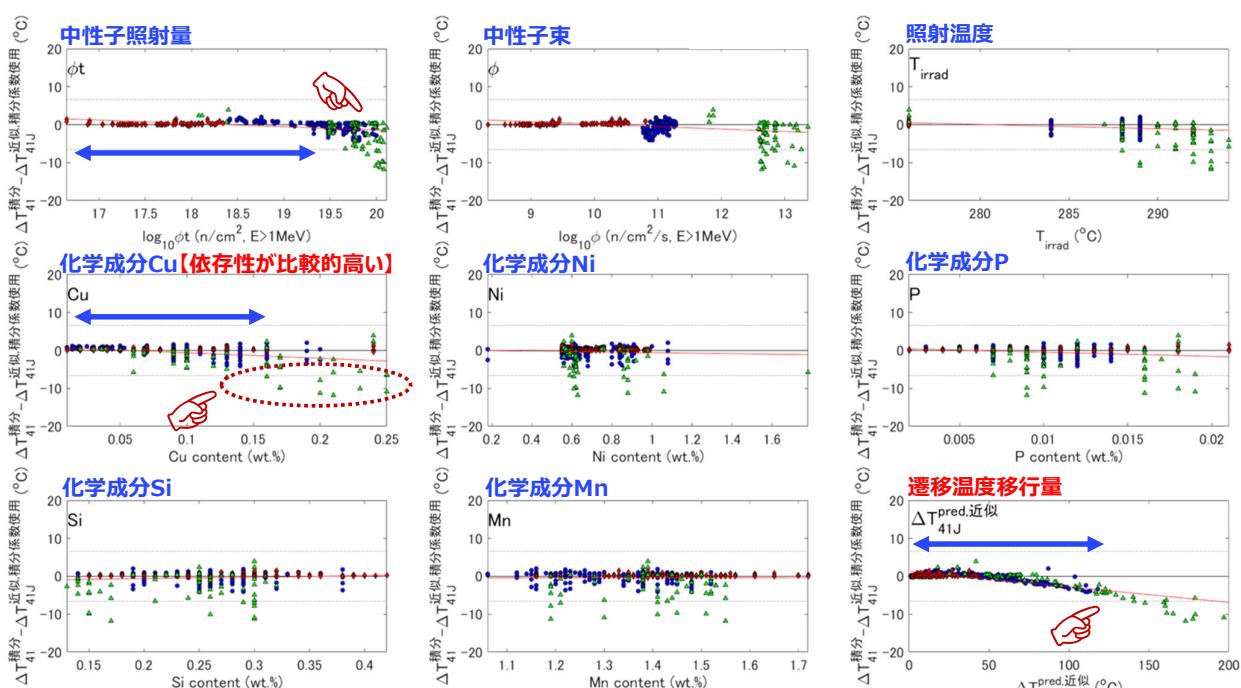
11

《2》①C40積分と②C40近似式の比較

近似式②に①積分式係数を適用し比較：②式の①式との差異について

パラメータ x_j に対する結果 (炉型で分類)

炉型 ●PWR ◆BWR ▲MTR

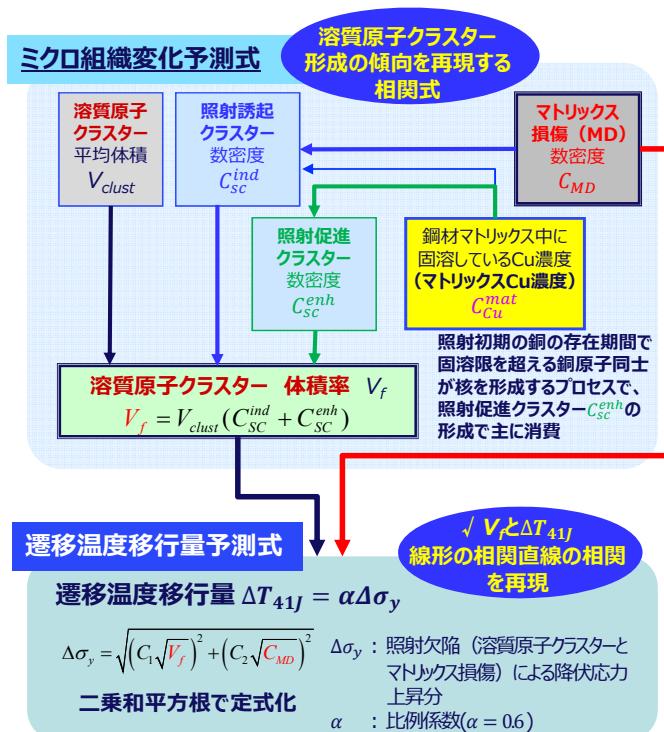


↔ 実機 ●PWR、◆BWR の
データで①②はよく一致

→ ①式→②式の近似条件に関連する高照射
量領域と高Cuで差がやや大の傾向

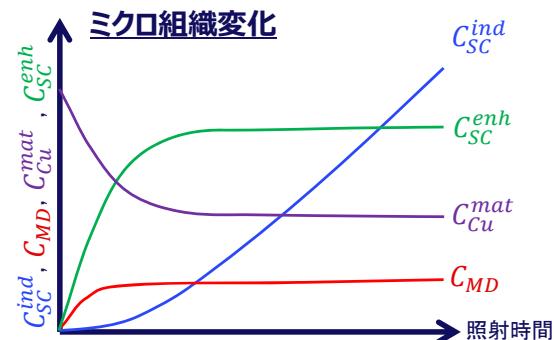
12

①C40積分の物理量の関係



溶質原子クラスターの数密度 C_{SC}

$$C_{SC} = C_{SC}^{enh} + C_{SC}^{ind}$$



備考：本図は照射量の適用範囲※の範囲で核物理量の関数イメージを模式的に示したもの ($\leq 1.3 \times 10^{20} (\text{n}/\text{cm}^2)$)

注記：長時間後の C_{SC}^{ind} の形成は、マトリックス損傷(転位ループなど)に Ni, Si, Mn が偏析することによる「不均一核生成」の増加であり、銅はほとんど消費しないと想定。

13

①C40積分の物理量の関係

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial}{\partial t} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$$

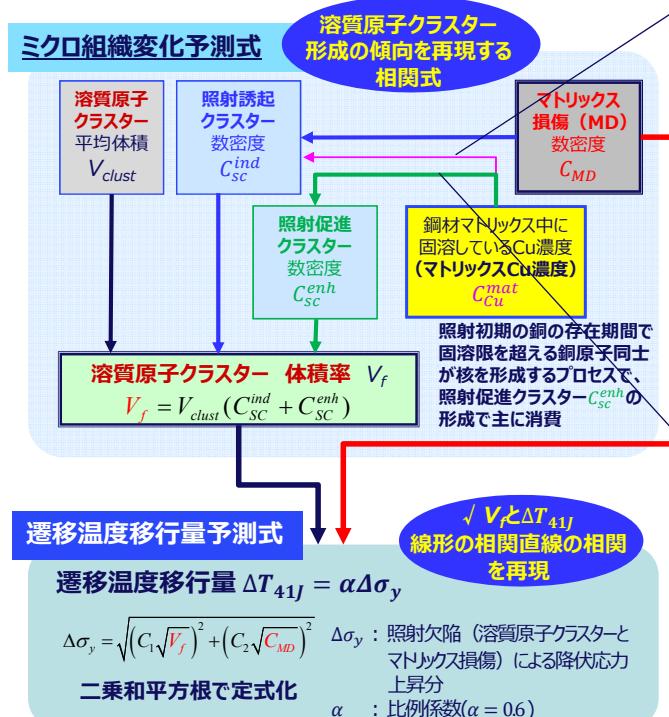
$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$$

《2》①C40積分と②C40近似式の比較

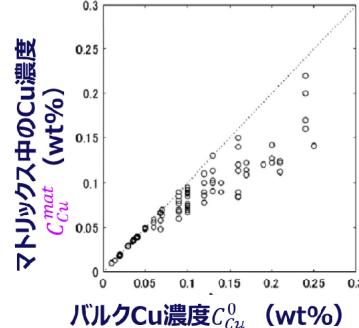
近似式②に①積分式係数を適用し比較：②式の①式との差異について

近似条件1、2の適用



近似条件1 ($C_{Cu}^{mat} \propto C_{Cu}^0$)

照射誘起クラスター C_{sc}^{ind} において、マトリックスCu濃度 C_{Cu}^{mat} はバルクCu濃度 C_{Cu}^0 に比例として近似



近似条件2 ($C_{sc} \approx C_{sc}^{enh}$)

マトリックスCu濃度 C_{Cu}^{mat} の消費分の溶質原子クラスター C_{sc} は、照射促進クラスター C_{sc}^{enh} で主に生じるとして近似

$$C_{sc} = C_{sc}^{enh} + C_{sc}^{ind} \approx C_{sc}^{enh}$$

$$C_{sc}^{ind} \leftarrow C_{MD} \leftarrow C_{Cu}^{mat} \propto C_{Cu}^0$$

$$C_{sc}^{enh} \leftarrow C_{Cu}^{mat}$$

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

15

《2》①C40積分と②C40近似式の比較

近似式②に①積分式係数を適用し比較：②式の①式との差異について

近似条件2の説明

近似条件2 ($C_{sc} \approx C_{sc}^{enh}$)

マトリックスCu濃度 C_{Cu}^{mat} の消費分の溶質原子クラスター C_{sc} は、照射促進クラスター C_{sc}^{enh} で主に生じるとして近似

C_{Cu}^{mat} 微分式において、
溶質原子クラスター $C_{sc} = C_{sc}^{enh} + C_{sc}^{ind}$ を
 $C_{sc} \approx C_{sc}^{enh}$ として近似

照射初期（短時間）

- 銅が存在している照射初期の期間で、固溶限を超える銅原子同士が核を形成するプロセスで C_{sc}^{enh} の形成が急速に進む（①）が、 C_{sc}^{ind} の形成は非常に少ない（②）ため、 $C_{sc} \approx C_{sc}^{enh}$ を近似条件として試行

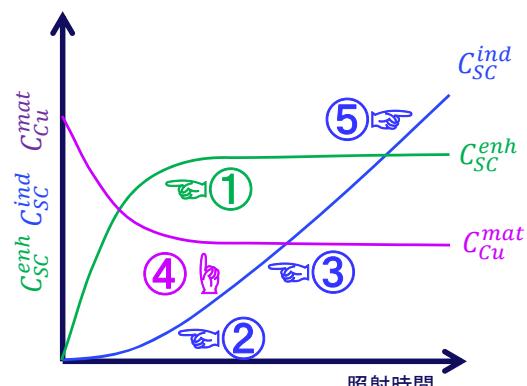
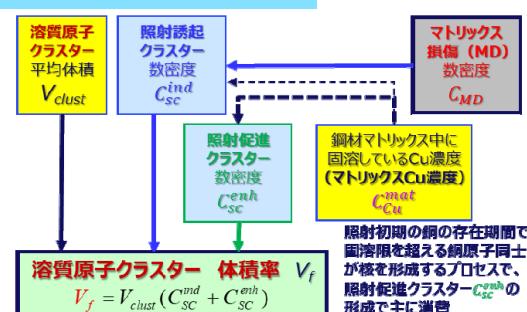
照射が長時間進行した後

- C_{sc}^{ind} が形成（③）されると銅の集積も起こるが、既に C_{Cu}^{mat} の量は十分減少（④）し C_{sc} 形成への銅の影響は十分小さくなる。
- 更に長時間後に C_{sc}^{ind} が形成（⑤）されるが、その形成は、銅がほとんど関与せず、マトリックス損傷（転位ループなど）に Ni, Si, Mn が偏析することによる「不均一核生成」の増加であり、銅はほとんど消費しない。

照射初期の想定に基づく近似条件

長時間照射後の C_{Cu}^{mat} の計算結果への
近似による影響は十分小さいと想定

ミクロ組織変化に関する構成項



備考：本図は照射量の適用範囲※の範囲で核物理量の関数イメージを模式的に示したものです。
(※ $\leq 1.3 \times 10^{20}$ n/cm²)

16

近似条件1適用前の①C40積分の物理量の関係

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial}{\partial t} (C_{SC}^{ind} + C_{SC}^{enh})$$

近似条件1 ($C_{Cu}^{mat} \propto C_{Cu}^0$)
 照射誘起クラスター C_{SC}^{ind} において、マトリックスCu濃度 C_{Cu}^{mat} はバルクCu濃度 C_{Cu}^0 に比例として近似

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$$

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$$

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

17

近似条件1適用後の①C40積分の物理量の関係

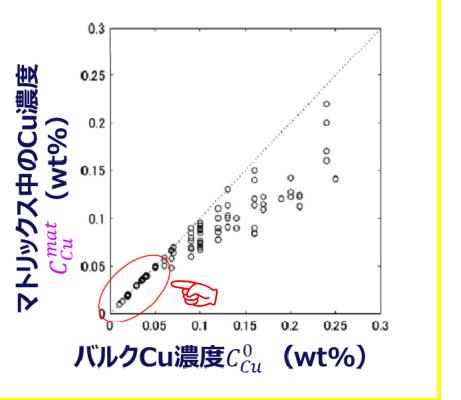
$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -d_1 \left\{ 1 + d_2 \left(\frac{(C_{Cu}^0)^{d_3}}{C_{Cu}^{0,mean}} \right)^{d_4} \right\} \left\{ 1 + d_5 \left(\frac{\phi^{d_6}}{\phi^{mean}} \right)^{d_7} \right\} \left\{ 1 + d_8 \left(\frac{T_{irrad}^{d_9}}{T_{irrad}^{mean}} \right)^{d_{10}} \right\} \frac{\partial}{\partial t} (C_{SC}^{enh})$$

C_{SC}^{mat}の式における
 $C_{SC} = C_{SC}^{enh} + C_{SC}^{ind}$
 $\approx C_{SC}^{enh}$ の近似

$$\frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} = a_1 \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_3} (1 + a_4 C_{Cu}^{mat}) C_{MD}$$

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = b_1 \left\{ 1 + b_2 \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{b_3} \right\} \phi^{b_4} \left(1 + \frac{b_5}{T_{irrad}} \right) - \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\} \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) (C_{Cu}^{mat} - a_{14})^2$$



①式と②式との差異：近似により予測式間のフィードバックの簡素化が関係

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

18

微分方程式形式の①C40積分により遷移温度移行量を評価した。

評価にあたり、係数の最適化で使用したデータベースは、日本電気協会のJEAC4201の改定検討に用いた最新のものを適用した（APPENDIX参照）

《1》①C40積分とJEAC4201-2013現行式の比較

- 微分方程式形式（①C40積分）のミクロ組織変化予測式で、最新データベースの再現性を確認した結果、現行式より再現性が向上していることを再確認した。
- 遷移温度移行量を評価した結果、現行式と同等の評価性能を確認した。

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

19

《2》①C40積分と②C40近似の比較

②式の係数を①式と同一とし、両者の差異を比較することで②式の導出の際の近似条件の影響を検討した。

【遷移温度移行量とミクロ組織変化の比較】

遷移温度移行量

ΔT_{41J} が100°Cを超えると、主として試験炉照射データ（MTR）で②C40近似（積分式係数使用）が①C40積分よりやや高めになる傾向があるが、概ね1対1であり、近似式②は微分方程式形式①の評価をよく再現していることを確認した。

ミクロ組織変化

溶質原子クラスターの数密度 C_{sc} が①C40積分より高めになる傾向があるが、遷移温度移行量との比例関係が認められている V_f （= $V_{dust} \times C_{sc}$ ）の平方根の再現性はほぼ同等であることを確認した。

【②C40近似の①C40積分との差異について】

ASTM E900-15と同様の手法を採用し、係数を最適化したデータベースのパラメータ（照射条件、照射温度、化学成分等）依存性を、「 ΔT_{41J} の①式と②式の計算値の差」で評価し、炉型（BWR, PWR, MTR）ごとの傾向を分析した。

その結果、①式（微分方程式形式）から②式（近似式）を導出する過程で想定した近似条件に関連して高Cu鋼材の高照射量領域でやや差が大きい傾向であることを確認した。

APPENDIX 係数の最適化に使用したデータベースについて

本付録の検討に用いた監視試験及びAPT測定データのデータベースは、日本電気協会 破壊靱性検討会でJEAC4201の改定検討の際に見直されたデータベースである。

本資料は、JEAC4201の改定検討に使用したデータベースについて、IET小委員会で使用したデータベースからの見直し内容についてまとめた。

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

APPENDIX

21

係数の最適化に使用したデータベースについて

IET小委員会データベースからの見直について以下に示す。

(1) データベースの拡充※

① 国内実機監視試験データ【IET小委に同じ】

出典1：平成14年度 原子力プラント機器高度安全化対策技術（重要機器等脆化評価等）事業報告書、独立行政法人原子力安全基盤機構

② 試験炉照射データ

出典2：昭和61年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書[原子炉圧力容器動加圧熱衝撃試験]、財団法人発電設備技術検査協会

➤ 国内実機保管材【IET小委に同じ】

➤ PLIMプロジェクト【母材2鋼種追加※】出典1

➤ PTSプロジェクト【母材1溶接金属2鋼種追加※】出典2

※ 国内監視試験と照射炉試験の全データを、同一プラント・材料で1セットとすると、IET小委192標本→本検討197標本に拡充。

□ IET小委員会のデータベース（192標本）

試験炉照射データベースは、国プロ（出典1, 2）の照射材に対し、三次元アトムプローブ（APT）測定した母材と溶接金属のみ格納

□ 本規格化提案検討のデータベース（拡充と再整備：197標本）

✓ 試験炉照射データベースに、国プロ（出典1, 2）で追加でAPT測定していない母材と溶接金属の計5種供試材を追加。

✓ 国プロ（出典1, 2）の中性子照射量及び中性子束を、プロジェクト計画値から、照射実績に基づく値に見直し。

APPENDIX 22

(2) アトムプローブ（APT）測定データの諸元の再整備

① 国プロ APT測定データ

➤ JNES報告書[1][2][3][4]に出典を統一【出典の明確化】

JNES報告書[1][2][3][4]発刊後、国プロ11供試材に対し、APTの追加測定がされており、この追加測定データとJNES報告書記載値が混在していた。

追加測定データは未公表データとなるため、これらのデータをJNES報告書記載の公開データに見直し出典を統一。

- [1] 「平成18年度 高照射領域の照射脆化予測に関する報告書」独立行政法人原子力安全基盤機構 (平成19年7月)
- [2] 「平成19年度 高照射領域の照射脆化予測に関する報告書」独立行政法人原子力安全基盤機構 (平成21年1月)
- [3] 「平成20年度 高照射領域の照射脆化予測に関する報告書」独立行政法人原子力安全基盤機構 (平成21年12月)
- [4] 「平成21年度 高照射領域の照射脆化予測に関する報告書」独立行政法人原子力安全基盤機構 (平成22年11月)

② 保管材 APT測定データ

➤ 測定データの有効桁数の見直し

測定データの有効桁数を踏まえた四捨五入処理により保管材3種のデータを見直し。

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

APPENDIX 23

(3) 計算に用いるデータベース平均値※の有効桁数見直し

※：APT測定クラスター数 $N_{clust}^{meas} \geq 50$ の平均値

「計算に用いるデータベースの平均値（上付： $mean$ の係数）」の有効桁数をIET小委から見直し

【IET小委】解析コード計算桁数（表記：有効数字3桁）

計算に用いるデータベースの平均値					
ϕ^{mean}	2.84E+12	$C_{Ni}^{0,mean}$	7.07E-01	$C_{Mn}^{0,mean}$	1.37E+00
$C_{Cu}^{0,mean}$	9.81E-02	$C_{Si}^{0,mean}$	2.53E-01	T_{irrad}^{mean}	288E+02

照射促進クラスター数密度【C40積分】の例

$$\frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = a_5 \left\{ 1 + a_6 \left(\frac{C_{Si}^0}{C_{Si}^{0,mean}} \right)^{a_7} + a_8 \left(\frac{C_{Mn}^0}{C_{Mn}^{0,mean}} \right)^{a_9} \right\}$$

【規格改定】中性子束 ϕ^{mean} 及び化学成分 $C_x^{0,mean}$ ：有効数字2行
照射温度 T_{irrad}^{mean} ：整数行

計算に用いるデータベースの平均値					
ϕ^{mean}	2.8 E+12	$C_{Ni}^{0,mean}$	0.71	$C_{Mn}^{0,mean}$	1.4
$C_{Cu}^{0,mean}$	0.10	$C_{Si}^{0,mean}$	0.25	T_{irrad}^{mean}	288

$$\times \left\{ 1 + a_{10} \left(\frac{C_{Ni}^0}{C_{Ni}^{0,mean}} \right)^{a_{11}} \right\} \left(1 + \frac{\phi}{a_2 \phi^{mean}} \right)^{a_{12}} \left(1 + \frac{a_{13}}{T_{irrad}} \right) \left(C_{Cu}^{mat} - a_{14} \right)^2$$

Copyright ©2021 Central Research Institute of Electric Power Industry, All Right Reserved.

APPENDIX 24

中性子照射脆化予測式改定案への意見

氏名：木村 晃彦

1. 国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて

ご意見：

●これまでの改定案策定の経過をたどると、当初の実機監視試験結果からは、溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})の間に明確な線形の相関があるとは言い難いと感じていました。一方、最近の加速試験による高照射量領域におけるデータを加えた図によれば、線形の相関があるように見受けられます。損傷速度依存性を考慮しなければ、今回の方針は妥当であると言えます。今後、照射硬化・脆化挙動の高精度予測のため、損傷速度依存性の調査を継続する事はもちろん重要ですが、以下について継続的に検証していく事が肝要です。

1) $\Delta T_{41J} \propto \Delta \sigma_y$ (1)、 $\Delta \sigma_y \propto \sqrt{V_f}$ (2)、 $\Delta T_{41J} \propto \sqrt{V_f}$ (3) の検証

(1)式は広く受け入れられており、問題は無いと言えますが、(2)式については今後も検証していく必要があります。一方、(2)式を考慮すること無く、 $\Delta T_{41J} \propto \sqrt{V_f}$ (3) とダイレクトに示すことについては、当該クラスターを鉄鋼材料中の介在物の体積率と置き換えれば、介在物の体積率の増大により脆化することを示しており、破壊の最弱リンクモデルと論理的に適合しているかもしれません。ただし、この場合も介在物の数や存在場所も重要な因子となるので、必ずしも体積率だけで決まるとは言えないのが実情です。いずれしても、(2)式の検証は重要ですので、以下にもう少し具体的に述べます。

2) 強化機構の検証

転位論によれば、転位運動に対する障害の強さ（強化）は、分散する障害物の平均の障害物間距離(L)の逆数に比例するとされ、固溶体強化、加工硬化、分散強化を表す式の根本となっています（合金元素濃度、転位密度、粒子密度など、表記対象が変わりますが、原理に立ち返れば、すべて $1/L$ に比例することになります）。 V_f と L の相関において、反比例の関係があることはこれまでの研究において明示されている例が少ないため、これを検証するための研究は今後も重要です。また、実機が経験する以上の高照射量側では照射時間の経過とともに、クラスターの体積率が増大しつつして、 V_f が飽和することは自明であり、いわゆる Ostwald 成長などの軟化を伴う過時効現象に繋がるはずです。従って、特にモデル式を提案する際には、この過時効現象を取り込んだ形にするか、現行の規準において指摘されている「適合可能な照射量を設定する」ことが肝要です。また、 $\Delta \sigma_y \propto \sqrt{V_f}$ の検証と同じく、 $\sqrt{(N \cdot d)}$ や $\sqrt{V_f/d}$ で表現する手法の検討も合わせて調査研究されては如何でしょうか（N: クラスター数密度、d : クラスター直径）。

2. ミクロ組織変化予測式改定案で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる（不均一核生成）との考え方について

ご意見：

●おそらく妥当であると思いますが、今後の研究課題の一つです。特に、転位ループやマイクロボイドとの関わりが重要であり、照射温度が強く影響すると推測できるので、照射温度を実験のパラメータとして研究する方法が効果的と思います。

3. 改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について

ご意見 :

- 各強化因子の定義を明確にする必要があると思います。

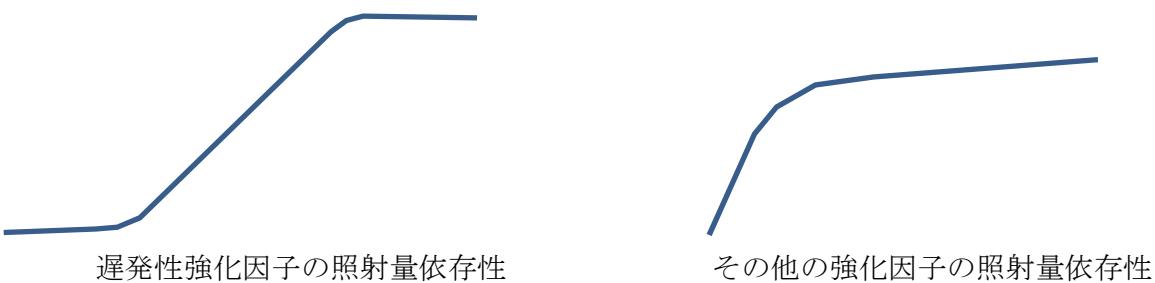
- ・因子 A : Cu クラスター (原子 20 個以上 : APT 認識可能)
- ・因子 B : Cu 以外のクラスター (原子 20 個以上 : APT 認識可能)
- ・因子 C : 全ての微小なクラスター (原子 19 個以下 : APT 認識不可能)
- ・因子 D : 転位ループ (TEM 観察可能)
- ・因子 E : 微細な転位ループ (TEM 観察不可能)
- ・因子 F : 微細な空孔集合体 (PAS 測定可能)

因子 A, B, D, F については、測定可能であり、最初の提案式 ($\Delta \sigma_y$) の表記に取り込むことが可能です。例えば、

$$\Delta\sigma_y = \sqrt{\sum_{k=A,B,D,F}^n (C_k \sqrt{N_k \cdot d_k})^2}$$

因子 C, E については、実態が同一の物であるとも考えられますが、適切な仮定のもと、係数最適化法を適用して検討する必要があると考えます。また、各因子の強度因子 (α) については、適切な値を採択し、固定する必要があると思われますので、今後の課題です。（係数最適化では、固定の意味が消えてしまいますが、適切な値であることの検証により、予測式の妥当性を評価できると思います）。

照射初期において測定不能な強化因子の数密度の照射時間依存性については、その関数形が不明ですが、いわゆる遅発性の成分に対しては、長時間側で飽和傾向を示す下図のような双曲線関数が良いと思います。あるいは、実機における照射量の範囲は高照射量側における飽和の手前であることを明示する必要があります（できれば、飽和する式を用いる方が良いと思います）。遅発性の成分以外の強化因子の関数形については、従来通りで良いと思います。



4. 改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方について

ご意見：

- 二乗和平方根として定式化する点については、これは統計処理の一つの方法ですので、間違いではありませんが、妥当であるかどうかの判断は結果に依存します。単純和でも試して、比較しておけばよいと思います。一般的に、本件の様に短範囲影響障害物については、二乗和平方根が採用されており、長範囲影響障害物については、単純和が採用されていることが多いです。

- 課題は、マトリックス損傷に分類されていながら溶質原子クラスターとして評価する溶質原子クラスターの核となる転位ループの扱いで、式の上では二乗和平方根して表記されているが、計算上は ΔT_{MD} に取り込まれず、 ΔT_{SC} として計算されていることで、定義とアルゴリズムが矛盾していることです。元来、二乗和平方根による取り扱いは、各項目の因子、すなわち、運動転位への障害強度（強度因子）が異なる場合の各因子の寄与を分離して示すために用いられており、均一核生成クラスターと不均一核生成クラスターの強度因子が同じであれば、溶質原子クラスターの核となる転位ループを ΔT_{SC} の項に取り込むことは適切ですが、異なる場合は ΔT_{MD} の項に取り込む必要があります。また、言うまでもありませんが、溶質原子の偏析の少ない、いわゆる転位ループやマイクロボイドは ΔT_{MD} の項として計算されるべきです。

5. 改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について

ご意見：

- 初期降伏応力の寄与を考慮すること自体に異存はありませんが、熱活性化成分と非熱活性化成分に分類して議論することには多くの困難を伴うと思います（検証が困難なため）。初期 USE を考慮してはどうでしょうか？

6. 改定案の係数最適化に際して、2013年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて

ご意見：

- 妥当であると思います。

7. 改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)

ご意見：

- Cu濃度による予測式の場合分け

Cu濃度に依存した異なる予測式があつても良いと思います。Cu濃度範囲を2、3設定し、各濃度範囲における予測式を個別に提案し、その妥当性をそれぞれ評価してみてはどうでしょうか。

- 過去のデータに基づいた予測式であることを認識する

現状の予測式は、今後、硬化・脆化機構が変化しないとの仮定の下で成立するものであることを念頭において監視する必要があります。加速試験データを見れば、硬化・脆化機構に大きな変化は無いと推測できますが、それを結論するには長寿命プラントの監視試験データの蓄積

(実証) が不可欠です。

● M_c 補正の考え方

予測式改訂のためにこれまで多くの議論と詳細な検討を積み重ねてきましたが、その結果として改めて M_c 補正の位置づけを考えてみると、 M_c 補正是一見安易過ぎる方法であり、「印象が悪い」と感じられてしまいます。 M_c 補正を要するプラントの数は知れており、その材料科学的な理由は必ず存在するはずですので、それを明らかにするための材料研究や試験方法の検討がまず必要です。次に、 M_c 補正が従来の傾向からの「ずれ」の大きさを緩和させる方法であることを説き、この補正（適正化）がさらに安全性を保障するものであることを材料科学と統計学に基づいて示せば、問題は無いように思います。一方、今後の監視試験において予測式からの大きな「ずれ」が生じた場合、補正なのか、新機軸なのか、適切な判断が求められます。照射効果に係る材料照射研究の重要性がここにあると思います。

●USE 予測

$\Delta DBTT$ の予測式の検討は進んでいますが、実機で問題となりそうなのは $\Delta DBTT$ よりも照射後の USE の値だと思います。破壊靱性値と応力拡大係数の比較で安全性が担保されるところですが、そこでは延性域での破壊エネルギー（破壊靱性値）の低下を考慮していないため、実際上、問題になることも生じてくると懸念されます。十分に精査しておくことが肝要です。

8. 改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について

ご意見：

- $\Delta \sigma_y \propto \sqrt{V_f}$ の検証 ($\Delta \sigma_y \propto (\sqrt{V_f}) / d$ 、 $\Delta \sigma_y \propto \sqrt{(N \cdot d)}$)
- RPVS における微小クラスターの核生成と微小転位ループの相関
- RPVS における転位ループの照射硬化における役割（貢献度：強化因子 α ）の検証
- RPVS における照射硬化・脆化の照射量依存性に及ぼす Mn, Si の影響
- 各種 RPVS (A508, A533) の照射脆化感受性評価
- APT 法における cluster size/number density 評価手法と硬度変化との相関
- DBTT/USE/Hv 相関の照射量依存性
- HAZ 部の監視試験における微小試験片技術の適用性評価
- 国内監視試験結果の照射量依存性と予測式における Cu 濃度依存性

中性子照射脆化予測式改定案への意見

氏名： 阿部 弘亨

1. 国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて

ご意見：

測定データに即しており、また理論的な裏付けもあることから問題なしと考えます。

2. ミクロ組織変化予測式改定案で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方について

ご意見：

照射欠陥がクラスターの核になるという考え方は妥当なものと思います。一方で、その数密度の式については理論的なバックグラウンドの補強が必要と思います。

3. 改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について

ご意見 :

式の形については妥当なものと思います。ただ、損傷速度を考えると、現案で非常に早期に飽和に至っているという考え方が妥当であるかどうかは、理論的な補強が必要と考えます。

4. 改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方について

ご意見 :

測定データによる裏付けもあることから問題なしと考えます。

5. 改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について

ご意見：

遷移温度の移行量の予測であり、またプラントによる初期降伏応力のばらつきが（一般材と比べて）小さいと想定されますので、「考慮しない」というよりも「差異が小さく何某かの依存性があるとは一概に言えない」ということなのではないかと思われますが、いかがでしょうか。

6. 改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて

ご意見：

本来は重みづけの必要は無く、データが拡充したことにより達成できたものであり、適切な観点と思います。

7. 改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)

ご意見 :

複数の予測式で構成されていますが、その一部にはさらなる理論的な補強が必要と考えられます。既往研究の参照を適切に行うなど対応いただければと思います。一方で、早期の規格化が最も求められている案件でもあります。まずは規格化を進めていただくことが肝要で、並行して補強に務めていただければと思います。

8. 改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について

ご意見 :

現段階では特にありません。

中性子照射脆化予測式改定案への意見

氏名：永井 康介

1. 国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて

ご意見：

統計的に線形傾向は見られており、現在の知見の範囲で妥当と思われる。ただし、個別の炉ごとに細かく見ると同じ傾きの線形相関があるかに関しては高々4点しかないデータから結論するのは難しい。また、溶質原子クラスター(APTで見られるものという定義)と一言でいっても、硬化への寄与(転位の運動への障害強度)はクラスターの組成依存性、欠陥集合体との複合体形成の有無等で大きく異なってしかるべきであるが、現在はそれを1種類として考えている。真の機構論に基づいた予測式に近づくためには、この点は考慮していくべきであり、将来的に上記の線形関係に固執すべきではないと思う。

2. ミクロ組織変化予測式改定案で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方について

ご意見：

この考え方方が正しいかどうか、というよりは、提案モデルでは、照射欠陥を核として形成した溶質原子クラスターのことを照射誘起クラスターと定義する、ということだと思う。

高Cuでは均一核生成もあり(おそらくそちらの方が支配的)、低Cuでは不均一核生成の方が支配的ではあるが、まだ核となる欠陥集合体の形成過程(特に照射初期段階)が完全に明らかになっているわけではないので、不均一核生成の割合がどの程度かについては現在研究中のテーマであろう。

いずれにしても、脆化予測式の目的として、上記が正しいかどうかを結論する必要はない(もちろん、将来的に外挿などを考える場合には、より正しい機構論に基づく必要があり、上記に関する理解が進むことは大変好ましい)。

3. 改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について

ご意見 :

これについても、正しいかどうかは、欠陥集合体の形成過程が実験的に完全に明らかになっているわけではないので、現在の知見で結論が出るものではない。改定案の考え方は仮定であっても、様々なパラメータを適切に設定し、監視試験データが系統的な矛盾が出ずに説明できれば、予測式の目的としては妥当である。

4. 改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方について

ご意見 :

IET 委員会の議論でもあったように、照射前の硬度がどのような寄与がどの程度あるのかによって、照射による変化に違いがありうる。

これも、結果として、監視試験データの傾向を正しくフォローできていれば良いということになると思う（もちろん、将来的に外挿などを考える場合には、上記に関する理解が進むことが好ましい）。

5. 改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について

ご意見：

4. のコメント参照のこと。

6. 改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて

ご意見：

本来、データに人為的な重みをつけることは、客観性の観点であまり好ましくないので、正しい方向である。

ただ、前回の改訂で、重みをつけることが高照射領域の精度を上げる、と説明してきた経緯がある。なぜ今回は重み付けをしなくて良いのか、合理的な説明ができる必要がある。

例えば、今回の最適化でも前回と同様の重み付けを行ったものと行っていいもののを比較して、両者に差がないことを示すなど（この場合も、前回では差があったのに、なぜ今回は差が出ないのか、それなりの理由の説明は求められると思う）。

7. 改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)

ご意見 :

何度も委員会で述べているが、 σ を小さくすることと、より信頼性の高い予測式であることとは別物であることを明確にすべき。特に、現行式、改訂式とも多くの適合パラメータを含む方法では、パラメータを増やせば、 σ を小さくすることは難しくない。

改訂式では、目的関数に溶質原子クラスターに関する項を入れているが、当然、遷移温度上昇に関しては、それを入れない方が良くフィットする。これは、まだ真のメカニズムを反映しているわけではないということの証明でもある。完全に反映することは不可能であることは理解しているが、まだ機構の理解を深める余地があることと、それが予測式の信頼を高めることにつながることを理解して進めるべきである。

オフセットの考え方に関しても、委員会で述べているとおり。初期値も入れてパラメータの最適化をすることは妥当だが、 σ の評価には注意が必要。すなわち、高々5点のデータからでは初期値の「推定値」の不確定さは無視できない。その分を考慮する必要がある。規格策定段階で別途考慮するとしているが、本委員会と全く切り離して議論する内容か？

8. 改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について

ご意見 :

上記のコメントでも述べたように、

- ・一律に溶質原子クラスターといつても、硬化への寄与には、組成依存性、欠陥集合体との複合体形成の有無などが大きく影響するはずで、それらの理解がより進むことが大切。
- ・マトリックス損傷の本質の理解はとても大切な課題。アトムプローブ全盛になって以降、その結果は見た目に非常にわかりやすいため、研究が溶質原子クラスターに偏りすぎている印象。照射誘起クラスターの核にもなるマトリックス損傷の形成についての理解は不可欠。
- ・ミクロ組織変化と硬化の関係は、どの材料にとっても永遠のテーマの一つであるが、現状は単に古典的モデルを使って、合った、合わないの議論のみである。もう少し転位運動のメカニズムに立ち戻って研究自体を再構築するなど、ブレークスルーが必要。線形モデル、非線形モデルの件も、この二つにこだわることなく、今後も様々な検討が必要。

中性子照射脆化予測式改定案への意見

氏名： 橋本 直幸

1. 国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて

ご意見：

現状、この考え方が最も実データとフィットするので、相関式としては妥当と考える。

2. ミクロ組織変化予測式改定案で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方について

ご意見：

金属結晶中において、クラスター形成の核となり得るものとして、例えば、転位芯(コットレル雰囲気など)、クラウディオンなどが挙げられるが、照射によって過飽和に導入された点欠陥の方が、自身のエネルギーを小さくする方向としてクラスター化する確率の方が高いと思われる。

3. 改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について

ご意見 :

アトムプローブで観察不可能なクラスター予備軍は、結晶中に少なからず存在すると考えられる。しかしながら、これらがやがてクラスター化する或いはクラスターに吸収されて幾分か成長に寄与するかは判断できない。

4. 改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方について

ご意見 :

2乗和平方根の利用については、対象が Short Range に分布する障害物であることを考えれば、今のところ妥当であると考える。

5. 改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について

ご意見：

初期降伏応力の素性が明確でない以上、予測式に組み入れるのは困難(不適当)と考える。

6. 改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて

ご意見：

そうあるべきと思いますので賛同します。

7. 改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)

ご意見 :

意見なし。

8. 改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について

ご意見 :

さらに突き詰めていくとするなら、計算科学がさらに進んだときに備えて、現段階で観察あるいは実証不可能と思われるものをできるだけ列挙しておくことと存じます。たとえば、量子論に立脚した不均一分布（電子のチャージデンシティなど）や原子間化学的相互作用が点欠陥の移動度に及ぼす効果、粒界を含めた点欠陥や不純物の局所的分布と粒界強度への影響などが思いつきます。

中性子照射脆化予測式改定案への意見

氏名： 福元 謙一

1. 国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスタ一体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて

ご意見：

説明から相関性に基づく改定案は妥当と思われる。

2. ミクロ組織変化予測式改定案で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方について

ご意見：

Cu、Ni だけでなく、Mn、Si についても照射誘起及び照射促進クラスターとして取り込んでいる点は改定案を評価したい。

ミクロ組織変化予測式から遷移温度移行量予測式に変換する際の表現が、「微分方程式とならない定式化(近似)」となっているが、微分方程式を解くことによって得られた式により評価を行うことであるので、「微分方程式とならない」という表現は適切であるか再検討していただきたい。

見直した予測式による予測の中で、係数最適化の際のクラスタ一体積率と溶質原子クラスター、マトリックス Cu の誤差についての目的関数での各項の係数値をどのように決定したかが不明である。クラスタ一体積率の項が 1 に対し溶質原子クラスター、マトリックス Cu の項は 0.1 である理由について説明がほしい→最適化した結果が妥当であることを明示してもらいたい。

3. 改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について

ご意見 :

MDについては、MDとSCクラスターが同時に存在するような組織と、MD単独で存在するような組織との切り分け（照射誘起SCと照射促進SCの切り分けと同義になるかもしれないが）はいずれ必要になると思う。APTやTEM単独でその切り分けをすることは難しいが、SCとMDの密度が大きく異なるので、MDにSCクラスターが固着したり、MDの欠陥部分にSiなどの原子が固着（修飾？）することによって転位に対する障害物強度が変化することが予測されるので、今後測定精度向上やデータ情報蓄積によって検討が必要になる。

4. 改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方について

ご意見 :

3の観点からより多様な欠陥種での2乗和平方根として捉える必要があるかもしれないが、現段階ではSCとMDでの切り分けで評価できると思う。転位運動の障害として短距離相互作用として働くものと考えれば2乗和平方根で妥当。

5. 改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について

ご意見：

初期降伏応力の違いは組織で考えれば、粒界、加工転位密度、(析出物や粒界析出物分布) 等が挙げられる。粒界はホールペッチ則、加工転位はベイリーハーシュ則により降伏強度増加分を推定することができ、運動転位との長距離相互作用による障害として、粒界と加工転位のそれぞれの寄与を初期降伏応力による強度増加予測に繰り込むことは可能と思う。現状で初期降伏応力を求める鋼の粒径や加工転位密度の情報が得られないとなれば、予測に含めずこの点は今後の検討課題とすることに異議はない。今後の研究で明らかにされていくことを希望する。一方で炉型やヒートの違いとしてオフセットの導入の説明に、各炉各ヒート種の個性として初期応力状態の違いを使うのであろうか? 材料由来の不確定性とほかの因子による不確定性については、別々に表現できないだろうか。

6. 改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて

ご意見：

意見なし。

7. 改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)

ご意見 :

この予測式は事業者の間での利用を目途にしていると理解しているが、国民に対して開示することを想定しているのであれば、付録Cに示される「代表的な炉に対する T_{41J} 予測式の適用例」などのデータセットを充実することが望ましい。また内挿により得られたものであるため、今後の高経年化に伴う運転において新たな脆化メカニズムの発現に伴う予測データのぞれには未対応であることを明確に示して対応可能になるよう準備しておく必要がある。同時に廃炉材などを用いた長時間側、低フラックス側のデータ取得についても継続して行われ、予測式に反映させていく事が望まれる。一般に対して開示される説明内容に関して、すべてにしっかりと根拠のある説明がなされるよう準備していただくよう強く望む。

8. 改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について

ご意見 :

意見なし。

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
1	国内照射材のアトムプローブ測定により得られる溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度移行量(ΔT_{41J})に線形の相関が見られるとの知見に着目して改定案を策定していることについて	木村	<p>●これまでの改定案策定の経過をたどると、当初の実機監視試験結果からは、溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)と遷移温度上昇量(ΔT_{41J})の間に明確な線形の相関があるとは言い難いと感じていました。一方、最近の加速試験による高照射量領域におけるデータを加えた図によれば、線形の相関があるように見受けられます。損傷速度依存性を考慮しなければ、今回の方針は妥当であると言えます。</p> <p>今後、照射硬化・脆化挙動の高精度予測のため、損傷速度依存性の調査を継続する事はもちろん重要ですが、以下について継続的に検証していく事が肝要です。</p> <p>1) $\Delta T_{41J} \propto \Delta \sigma_y$---(1)、 $\Delta \sigma_y \propto \sqrt{V_f}$---(2)、 $\Delta T_{41J} \propto \sqrt{V_f}$---(3) の検証</p> <p>(1)式は広く受け入れられており、問題は無いと言えますが、(2)式については今後も検証していく必要があります。一方、(2)式を考慮すること無く、$\Delta T_{41J} \propto \sqrt{V_f}$---(3) とダイレクトに示すことについては、当該クラスターを鉄鋼材料中の介在物の体積率と置き換えれば、介在物の体積率の増大により脆化することを示しており、破壊の最弱リンクモデルと論理的に適合しているかもしれません。ただし、この場合も介在物の数や存在場所も重要な因子となるので、必ずしも体積率だけで決まるとは言えないのが実情です。いずれしても、(2)式の検証は重要ですので、以下にもう少し具体的に述べます。</p> <p>2)強化機構の検証</p> <p>転位論によれば、転位運動に対する障害の強さ(強化)は、分散する障害物の平均の障害物間距離(L)の逆数に比例するとされ、固溶体強化、加工硬化、分散強化を表す式の根本となっています(合金元素濃度、転位密度、粒子密度など、表記対象が変わりますが、原理に立ち返れば、すべて $1/L$ に比例することになります)。V_f と L の相関において、反比例の関係があることはこれまでの研究において明示されている例が少ないため、これを検証するための研究は今後も重要です。</p> <p>また、実機が経験する以上の高照射量側では照射時間の経過とともに、クラスターの体積率が増大しつつして、V_f が飽和することは自明であり、いわゆる Ostwald 成長などの軟化を伴う過時効現象に繋がるはずです。</p> <p>従って、特にモデル式を提案する際には、この過時効現象を取り込んだ形にするか、現行の規準において指摘されている「適合可能な照射量を設定する」ことが肝要です。また、$\Delta \sigma_y \propto \sqrt{V_f}$ の検証と同じく、$\sqrt{(N \cdot d)}$ や $\sqrt{V_f/d}$ で表現する手法の検討も合わせて調査研究されては如何でしょうか(N:クラスター数密度、d:クラスター直径)。</p>	ご意見ありがとうございます。
			析出物等による強化の式に粒子間距離 L が含まれることはご指摘の通りです。一方、APT で観察されるクラスターには、IET 小委員会でもご指摘のあったように、種々の化学組成のものや転位ループと複合体を構成しているもの、構成していないものが混在している可能性があります。遷移温度上昇量(ΔT_{41J})と溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)の関係には、これらの影響が重畠して表れている可能性がありますが、現状の知見ではこれらを明確に区別することは難しく、ご指摘の点は今後の研究課題と考えております。【備考②】	
			今回の予測式構築においては、アトムプローブ測定によるデータの拡充も踏まえ、 (ΔT_{41J}) と溶質原子クラスター体積率の平方根($\sqrt{V_f}$)の間にみられる直線的な相関を再現することといたしました。	
			ご指摘の V_f の飽和については、今回検討したデータベースの範囲内ではなく、この範囲での使用において相関式として成立しているものと考えております。	
	阿部	測定データに即しておりまた理論的な裏付けもあることから問題なしと考えます	ご意見ありがとうございます。	
	永井	統計的に線形傾向は見られており、現在の知見の範囲で妥当と思われる。ただし、個別の炉ごとに細かく見ると同じ傾きの線形相関があるかに関しては高々4点しかないデータから結論するのは難しい。また、溶質原子クラスター(APT で見られるものという定義)と一言でいっても、硬化への寄与(転位の運動への障害強度)はクラスターの組成依存性、欠陥集合体との複合体形成の有無等で大きく異なってしかるべきであるが、現在はそれを1種類として考えている。真の機構論に基づいた予測式に近づくためには、この点は考慮していくべきであり、将来的に上記の線形関係に固執すべきではないと思う。	ご意見ありがとうございます。 上記の木村先生への回答にも記載しました通り、ご指摘の点につきましては、今後の研究課題であると認識しております。【備考②】	
	橋本	現状、この考え方方が最も実データとフィットするので、相関式としては妥当と考える。	ご意見ありがとうございます。	
	福元	説明から相関性に基づく改定案は妥当と思われる。	ご意見ありがとうございます。	

備考：課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ②研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
2	改定案のミクロ組織変化予測式で採用している、照射により形成された格子欠陥が照射誘起クラスター形成の核となる(不均一核生成)との考え方について	木村	<p>●おそらく妥当であると思いますが、今後の研究課題の一つです。特に、転位ループやマイクロボイドとの関わりが重要であり、照射温度が強く影響すると推測できるので、照射温度を実験のパラメータとして研究する方法が効果的だと思います。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 No.1への回答にも記載しました通り、転位ループ等の照射欠陥と溶質原子クラスターの関係については、今後さらに検討が必要と考えております。照射温度の影響につきましても、その中の検討課題の一つと考えております。【備考②】</p>
		阿部	<p>照射欠陥がクラスターの核になるという考え方は妥当なものと思います。 一方で、その数密度の式については理論的なバックグラウンドの補強が必要だと思います。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 今後の研究課題であると認識しております。【備考②】</p>
		永井	<p>この考え方が正しいかどうか、というよりは、提案モデルでは、照射欠陥を核として形成した溶質原子クラスターのことを照射誘起クラスターと定義する、ということだと思う。 高 Cu では均一核生成もあり(おそらくそちらの方が支配的)、低 Cu では不均一核生成の方が支配的ではあるが、まだ核となる欠陥集合体の形成過程(特に照射初期段階)が完全に明らかになっているわけではないので、不均一核生成の割合がどの程度かについては現在研究中のテーマであろう。 いずれにしても、脆化予測式の目的として、上記が正しいかどうかを結論する必要はない(もちろん、将来的に外挿などを考える場合には、より正しい機構論に基づく必要があり、上記に関する理解が進むことは大変好ましい)。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 不均一核生成プロセスの詳細については、No.1への回答にもある、照射促進クラスターと照射誘起クラスターの障害物強度の差異にも直接的にかかわることであり、将来課題としてさらなる理解が望ましいと考えております。 【備考②】</p>
		橋本	<p>金属結晶中において、クラスター形成の核となり得るものとして、例えば、転位芯(コットレル雰囲気など)、クラウディオンなどが挙げられるが、照射によって過飽和に導入された点欠陥の方が、自身のエネルギーを小さくする方向としてクラスター化する確率の方が高いと思われる。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p>
		福元	<p>Cu, Ni だけでなく、Mn, Si についても照射誘起及び照射促進クラスターとして取り込んでいる点は改定案を評価したい。 ミクロ組織変化予測式から遷移温度移行量予測式に変換する際の表現が、「微分方程式とならない定式化(近似)」となっているが、微分方程式を解くことによって得られた式により評価を行うことであるので、「微分方程式とならない」という表現は適切であるか再検討していただきたい。</p> <p>見直した予測式による予測の中で、係数最適化の際のクラスター体積率と溶質原子クラスター、マトリックス Cu の誤差についての目的関数での各項の係数値をどのように決定したかが不明である。クラスター体積率の項が 1 に対し溶質原子クラスター、マトリックス Cu の項は 0.1 である理由について説明がほしい→最適化した結果が妥当であることを明示してもらいたい。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 表現については「微分方程式の形式から近似式へ定式化」していることを踏まえ、資料「[IET-19-2-3] 中性子照射脆化予測式の基本モデル式の改定案」の冒頭「1. 照射脆化予測式の開発方針」にて、この旨を明記するとともに、簡略表記を行う場合は「近似式への定式化」と表記することとした。 ミクロ組織変化予測式の妥当性の確認を当初は下図(改定前)の通りとしており、Obj_{micro} 式に対して左記ご意見を頂きました。当初はケーススタディーとして実施した 0.1 等の係数を乗じて計算したケースを係数最適化として示しておりましたが、その後、クラスター体積およびマトリックス Cu の係数は別途最適化した結果で固定する方針に見直したこと、ご意見を踏まえ V_f のみの目的関数に変更(下図(改定後))したことから、評価結果についても V_f のみの目的関数で評価した結果に見直しました。</p> <p>【資料(改定前): 質問状配信時】</p> <p>2.3.1 係数最適化</p> <p>■ 目的関数が最小になるように係数を最適化</p> <ul style="list-style-type: none"> 最適化した係数: a_i, b_j 固定した係数: d_k, ζ_l $Obj_{micro} = \frac{\sum (V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum (V_f^{meas})^2} + 0.1 \frac{\sum (C_{SC}^{pred} - C_{SC}^{meas})^2}{\sum (C_{SC}^{meas})^2} + 0.1 \frac{\sum (C_{Cu}^{mat,pred} - C_{Cu}^{mat,meas})^2}{\sum (C_{Cu}^{mat,meas})^2} \rightarrow \min$ <p>クラスター体積率を 主な最適化対象 C_{SC}, C_{Cu}^{mat}についても最適化に際して考慮</p> <p>他の因子に対しても予測性を確保するため,</p> <p>【資料(改定後): [IET-19-2-3] 今回提示版】</p> <p>2.1.3 見直した微分式(妥当性の確認)</p> <p>(1) 係数最適化による確認</p> <p>見直したミクロ組織変化予測式が機能しているかを確認</p> <p>■ 目的関数が最小になるように係数を最適化</p> $Obj_{micro} = \frac{\sum (V_f^{pred} - V_f^{meas})^2}{\sum (V_f^{meas})^2} \rightarrow \min$ <p>V_f: クラスター体積率(-) 上付添字 Pred: 予測値 Meas: 測定値</p> <p>最適化対象: クラスター体積率</p>

備考 : 課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ②研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
3	改定案のミクロ組織変化予測式におけるマトリックス損傷(アトムプローブで測定できないものを総称)の数密度(C_{MD})の式の考え方について	木村	<p>各強化因子の定義を明確にする必要があると思います。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・因子 A: Cu クラスター(原子 20 個以上: APT 認識可能) ・因子 B: Cu 以外のクラスター(原子 20 個以上: APT 認識可能) ・因子 C: 全ての微小なクラスター(原子 19 個以下: APT 認識不可能) ・因子 D: 転位ループ(TEM 観察可能) ・因子 E: 微細な転位ループ(TEM 観察不可能) ・因子 F: 微細な空孔集合体(PAS 測定可能) <p>因子 A, B, D, F については、測定可能であり、最初の提案式($\Delta\sigma_y$)の表記に取り込むことが可能です。例えば、</p> $\Delta\sigma_y = \sqrt{\sum_{k=A,B,D,F}^n (C_k \sqrt{N_k \cdot d_k})^2}$ <p>因子 C, E については、実態が同一の物であるとも考えられますが、適切な仮定のもと、係数最適化法を適用して検討する必要があると考えます。また、各因子の強度因子(α)については、適切な値を採択し、固定する必要があると思われますので、今後の課題です。(係数最適化では、固定の意味が消えてしまいますが、適切な値であることの検証により、予測式の妥当性を評価できると思います)。</p> <p>照射初期において測定不能な強化因子の数密度の照射時間依存性については、その関数形が不明ですが、いわゆる遅発性の成分に対しては、長時間側で飽和傾向を示す下図のような双曲線関数が良いと思います。あるいは、実機における照射量の範囲は高照射量側における飽和の手前であることを明示する必要があります(できれば、飽和する式を用いる方が良いと思います)。遅発性の成分以外の強化因子の関数形については、従来通りで良いと思います。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>種々の強化因子が存在することはご指摘の通りです。</p> <p>また因子 C, E の区別が難しいこともご指摘の通りと思います。</p> <p>最近の永井先生のグループのご研究では、因子 A あるいは因子 B の一部が因子 D の転位ループ複合体を形成する場合のあることが指摘されています。またクラスターの化学組成による強化因子の違いについても IET 小委員会にて指摘のあった通りです。そのため、アトムプローブ(APT)で測定可能なクラスターには異なる強度を有するものが混在している可能性があります。また、同様に因子 C においても、いわゆる均一核生成により形成されるクラスターと転位ループを核とするクラスターが混在している可能性がありますが、現状の知見ではその区別は困難であることから、強度因子を個別に設定した検討は難しいと考えられます。従いまして、ご指摘の理論的議論を展開するためには、今後、さらなる知見の拡充が必要と考えています。【備考②】</p> <p>また、ご意見にある遅発性について長時間側で飽和傾向を示す成分については、本予測式が適用される照射量範囲では確認できていないため、今後の検討課題と捉えております。【備考③】</p>
		阿部	<p>式の形については妥当なものと思います。</p> <p>ただ、損傷速度を考えると、現案で非常に早期に飽和に至っているという考え方が妥当であるかどうかは、理論的な補強が必要と考えます。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>今後の研究課題であると認識しております。【備考②】</p>
		永井	<p>これについても、正しいかどうかは、欠陥集合体の形成過程が実験的に完全に明らかになっているわけではないので、現在の知見で結論が出るものではない。</p> <p>改定案の考え方は仮定であっても、様々なパラメータを適切に設定し、監視試験データが系統的な矛盾が出ずに説明できれば、予測式の目的としては妥当である。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>欠陥集合体の形成過程については、溶質原子クラスター形成過程にも関連することであり、将来的に検討すべき課題として認識しております。【備考②】</p>
		橋本	<p>アトムプローブで観察不可能なクラスター予備軍は、結晶中に少なからず存在すると考えられる。しかしながら、これらがやがてクラスター化する或いはクラスターに吸収されて幾分か成長に寄与するかは判断できない。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>欠陥集合体の形成過程については、溶質原子クラスター形成過程にも関連することであり、将来的に検討すべき課題として認識しております。【備考②】</p>
		福元	<p>MD については、MD と SC クラスターが同時に存在するような組織と、MD 単独で存在するような組織との切り分け(照射誘起 SC と照射促進 SC の切り分けと同義になるかもしれないが)はいずれ必要になると思う。APT や TEM 単独でその切り分けをすることは難しいが、SC と MD の密度が大きく異なるので、MD に SC クラスターが固着したり、MD の欠陥部分に Si などの原子が固着(修飾?)することによって転位に対する障害物強度が変化することが予測されるので、今後測定精度向上やデータ情報蓄積によって検討が必要になる。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>点欠陥集合体と溶質原子クラスターの相関については今後検討すべき課題であると認識しております。</p> <p>【備考②】</p>

備考 : 課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ② 研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③ より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
4	改定案の遷移温度移行量予測式において、遷移温度移行量を溶質原子クラスターによる分とマトリックス損傷による分の2乗和平方根として定式化する考え方について	木村	二乗和平方根として定式化する点については、これは統計処理の一つの方法ですので、間違いではありませんが、妥当であるかどうかの判断は結果に依存します。単純和でも試して、比較しておけばよいと思います。一般的に、本件の様に短範囲影響障害物については、二乗和平方根が採用されており、長範囲影響障害物については、単純和が採用されていることが多いです。	ご意見ありがとうございます。 線形和でも試計算し、同程度の予測性能があることを確認しました。提案式では、照射によって形成するクラスターとそれ以外のものは短距離で相互作用するとの前提のもと、2乗和平方根の定式化を採用しました。詳細については資料「[IET-19-2-5]遷移温度移行量予測モデル式の比較」を参照下さい。
		阿部	測定データによる裏付けもあることから問題なしと考えます。	ご意見ありがとうございます。
		永井	IET委員会の議論でもあったように、照射前の硬度がどのような寄与がどの程度あるのかによって、照射による変化に違いがありうる。 これも、結果として、監視試験データの傾向を正しくフォローできていれば良いということになると思う(もちろん、将来的に外挿などを考える場合には、上記に関する理解が進むことが好ましい)。	ご意見ありがとうございます。 ご指摘の通り、照射前の硬度(あるいはミクロ組織)が脆化に及ぼす影響については、引き続き検討を進めていきたく考えております。【備考②】
		橋本	2乗和平方根の利用については、対象がShort Rangeに分布する障害物であることを考えれば、今のところ妥当であると考える。	ご意見ありがとうございます。
		福元	3の観点からより多様な欠陥種での2乗和平方根として捉える必要があるかもしれないが、現段階ではSCとMDでの切り分けで評価できると思う。転位運動の障害として短距離相互作用として働くものと考えれば2乗和平方根で妥当。	ご意見ありがとうございます。
5	改定案の遷移温度移行量予測式において、現時点では初期降伏応力の寄与を考慮しないとした判断について	木村	初期降伏応力の寄与を考慮すること自体に異存はありませんが、熱活性化成分と非熱活性化成分に分類して議論することには多くの困難を伴うと思います(検証が困難なため)。 初期 USE を考慮してはどうでしょうか?	熱活性化成分と非熱活性化成分の分類について、多くの困難が伴うのはご指摘の通りです。そのため、初期降伏応力の寄与を考慮した非線形モデルについて今回は採用を見送ることとし、将来課題としました。 ご提案の初期 USE については、資料「[IET-19-2-7]中性子照射脆化予測式改定案における予測値の補正及びマージン設定の考え方」に示した通り、今回検討したデータベースに対しては明確な依存性は認められません。
		阿部	遷移温度の移行量の予測であり、またプラントによる初期降伏応力のばらつきが(一般材と比べて)小さいと想定されますので、「考慮しない」というよりも「差異が小さくが何某かの依存性があるとは一概に言えない」ということなのではないかと思われますが、いかがでしょうか。	IET小委員会で提案した非線形モデルは、同委員会でも指摘があったように今後明らかにすべき課題があることを踏まえた上で、データ分析に基づき定式化しており、初期降伏応力にばらつきがあるとしても現状知見ではその依存性について一概に述べられる状況にないと考えております。
		永井	4. のコメント参照のこと。	—
		橋本	初期降伏応力の素性が明確でない以上、予測式に組み入れるのは困難(不適当)と考える。	ご意見ありがとうございます。
		福元	初期降伏応力の違いは組織で考えれば、粒界、加工転位密度、(析出物や粒界析出物分布)等が挙げられる。粒界はホールペッチ則、加工転位はベイリー・ハーシュ則により降伏強度増加分を推定することができ、運動転位との長距離相互作用による障害として、粒界と加工転位のそれぞれの寄与を初期降伏応力による強度増加予測に繰り込むことは可能と思う。現状で初期降伏応力を求める鋼の粒径や加工転位密度の情報が得られないとなれば、予測に含めずこの点は今後の検討課題とすることに異議はない。今後の研究で明らかにされていくことを希望する。一方で炉型やヒートの違いとしてオフセットの導入の説明に、各炉各ヒート種の個性として初期応力状態の違いを使うのであろうか?材料由来の不確定性とほかの因子による不確定性については、別々に表現できないだろうか	ご意見ありがとうございます。 現段階で炉型やヒートの違いを考慮してオフセット補正を行う上で、初期降伏応力の違いを理由とすることは考えておりません。また、ご指摘の材料由来の不確定性とその他の因子による不確定性につきましては、例えば初期降伏応力(初期組織)の影響を前者、その他の影響については後者といった明確な切り分けは現状困難であり、今後の研究課題であると認識しております。【備考③】

備考：課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ②研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
6	改定案の係数最適化に際して、2013 年追補版と異なりデータに重み付けをしていないことについて	木村	妥当であると思います。	ご意見ありがとうございます。
		阿部	本来は重みづけの必要は無く、データが拡充したことにより達成できたものであり、適切な観点と思います。	ご意見ありがとうございます。
		永井	<p>本来、データに人為的な重みをつけることは、客観性の観点であまり好ましくないので、正しい方向である。</p> <p>ただ、前回の改訂で、重みをつけることが高照射領域の精度を上げる、と説明してきた経緯がある。なぜ今回は重み付けをしなくて良いのか、合理的な説明ができる必要がある。</p> <p>例えば、今回の最適化でも前回と同様の重み付けを行ったものと行っていないものを比較して、両者に差がないことを示すなど(この場合も、前回では差があったのに、なぜ今回は差が出ないのか、それなりの理由の説明は求められると思う)。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>個々のデータに対する重みを、現行式と同様の方針で、</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 遷移温度移行量の寄与分に対してのみつける場合 ② 全ての寄与分(遷移温度移行量およびミクロ組織に関する物理量)につける場合 <p>の 2 ケースについて、予測性能を提案式と比較しました。</p> <p>その結果、ケース①では遷移温度移行量に対する比率が強くなるため、ミクロ組織の予測が合わないという現行式と類似の傾向となることが確認できています。</p> <p>また、ケース②では低 EFPY のデータも含む ΔT_{41J} よりも高 EFPY のデータが中心となるミクロ組織に関する物理量の比率が強くなるため、逆に遷移温度移行量の予測が合わなくなります。また、ミクロ組織は元々高 EFPY のデータが中心となっており、ミクロ組織の予測性は提案式と大差ない結果となっています。</p> <p>これらの試解析から、提案式の最適化方針を達成する上では個々のデータに対して重みをつけないほうが適切であると考えられます。詳細については「[IET-19-2-6]最適化時に用いるデータセットに重みをつける検討」を参照ください。</p>
		橋本	そうあるべきだと思いますので賛同します。	ご意見ありがとうございます。
		福元	—	—

備考：課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ②研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
7	改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)	木村	<p>●Cu 濃度による予測式の場合分け Cu 濃度に依存した異なる予測式があっても良いと思います。Cu 濃度範囲を 2、3 設定し、各濃度範囲における予測式を個別に提案し、その妥当性をそれぞれ評価してみてはどうでしょうか。</p> <p>●過去のデータに基づいた予測式であることを認識する 現状の予測式は、今後、硬化・脆化機構が変化しないとの仮定の下で成立するものであることを念頭において監視する必要があります。加速試験データを見れば、硬化・脆化機構に大きな変化は無いと推測できますが、それを結論するには長寿命プラントの監視試験データの蓄積(実証)が不可欠です。</p> <p>●M_c補正の考え方 予測式改訂のためにこれまで多くの議論と詳細な検討を積み重ねてきましたが、その結果として改めて M_c補正の位置づけを考えてみると、M_c補正是一見安易過ぎる方法であり、「印象が悪い」と感じられてしまいます。M_c補正をするプラントの数は知れどおり、その材料科学的な理由は必ず存在するはずですので、それを明らかにするための材料研究や試験方法の検討がまず必要です。 次に、M_c補正が従来の傾向からの「ずれ」の大きさを緩和させる方法であることを説き、この補正(適正化)がさらに安全性を保障するものであることを材料科学と統計学に基づいて示せば、問題は無いように思います。 一方、今後の監視試験において予測式からの大きな「ずれ」が生じた場合、補正なのか、新機軸なのか、適切な判断が求められます。照射効果に係る材料照射研究の重要性がここにあると思います。</p> <p>●USE 予測 ΔDBTT の予測式の検討は進んでいますが、実機で問題となりそうなのは ΔDBTT よりも照射後の USE の値だと思います。 破壊靭性値と応力拡大係数の比較で安全性が担保されるとのことですが、そこでは延性域での破壊エネルギー(破壊靭性値)の低下を考慮していないため、実際上、問題になることも生じてくると懸念されます。十分に精査しておくことが肝要です。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 Cu 濃度に応じて予測式を変えるという切り口は今後の検討の参考とさせていただきます。【備考②】</p> <p>ご意見ありがとうございます。 現状の予測式では、実機の照射条件を念頭に適用範囲の制限を設けるとともに、その範囲内で現状の知見に基づき想定される硬化・脆化機構に基づく式となっています。ご意見の通り、今後の監視試験データの追加や、長期運転等による監視試験データの拡充を踏まえ、更なる予測式の高度化に向けて検討を進めます。【備考②】</p> <p>ご意見ありがとうございます。 M_c補正是個別プラントの評価の際の予測値の補正であり、具体的な運用方法は電気協会で検討されますが、現状の考え方について、「[IET-19-2-7]中性子照射脆化予測式改定案における予測値の補正及びマージン設定の考え方について」にまとめました。なお、M_c補正にはご指摘の材料科学的な観点だけでなく、統計学的な観点もあると考えており、双方併せての説明が必要と認識しています。</p>
		阿部	複数の予測式で構成されていますが、その一部にはさらなる理論的な補強が必要と考えられます。既往研究の参照を適切に行うなど対応いただければと思います。一方で、早期の規格化が最も求められている案件もあります。 まずは規格化を進めていただくことが肝要で、並行して補強に務めていただければと思います。	ご意見ありがとうございます。 IET 小委員会の議論結果を踏まえ、電気協会でも遅滞なく改定検討を進めたいと思います。【備考①】

備考：課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ② 研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③ より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題

「中性子照射脆化予測式改定案へのご意見伺いについて」へお寄せいただいたご意見及びそれに対する回答

No.	質問項目	意見者	ご意見	回答
7	改定案に対するその他のご意見について(もしあれば)	永井	<p>何度も委員会で述べているが、σを小さくすることと、より信頼性の高い予測式であることとは別物であることを明確にすべき。特に、現行式、改訂式とも多くの適合パラメータを含む方法では、パラメータを増やせば、σを小さくすることは難しくない。改訂式では、目的関数に溶質原子クラスターに関する項を入れているが、当然、遷移温度上昇に関しては、それを入れない方が良くフィットする。これは、まだ真のメカニズムを反映しているわけではないということの証明でもある。完全に反映することは不可能であることは理解しているが、まだ機構の理解を深める余地があることと、それが予測式の信頼を高めることにつながることを理解して進めるべきである。</p> <p>オフセットの考え方に関しては、委員会で述べているとおり。初期値も入れてパラメータの最適化することは妥当だが、σの評価には注意が必要。すなわち、高々 5 点のデータからでは初期値の「推定値」の不確定さは無視できない。その分を考慮する必要がある。規格策定段階で別途考慮するとしているが、本委員会と全く切り離して議論する内容か？</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 提案式では σ を小さくすることだけにこだわらず、APT により得られた結果の予測性も向上させることを目指したものとなっています。また、機構論の理解には課題が残されていることもご指摘の通りであり、現状では国内鋼材のデータベースの傾向の再現性を重視した式を構築しました。今後も予測式のさらなる高度化に向けて、メカニズムの解明等に取り組む予定です。【備考②】</p> <p>個別プラントの健全性評価では、ΔT_{41J} 実測値を評価に反映する観点から、引き続き差分平均値を用いた補正を行うことを考えております。マージンの設定に際しては、従来のように予測残差の標準偏差だけでなく、シャルピー衝撃試験による T_{41J} 実測値の不確かさや、個々の入力パラメータのばらつきによる脆化予測の不確かさ等を考慮して設定する方向で検討を進めています。【備考①】</p>
		橋本	—	—
		福元	<p>この予測式は事業者の間での利用を目的にしていると理解しているが、国民に対して開示することを想定しているのであれば、付録 C(改定案提案資料の Appendix C)に示される「代表的な炉に対する T_{41J} 予測式の適用例」などのデータセットを充実することが望ましい。また内挿により得られたものであるため、今後の高経年化に伴う運転において新たな脆化メカニズムの発現に伴う予測データのずれには未対応であることを明確に示して対応可能になるよう準備しておく必要がある。</p> <p>同時に廃炉材などを用いた長時間側、低フラックス側のデータ取得についても継続して行われ、予測式に反映させていく事が望まれる。一般に対して開示される説明内容に関して、すべてにしっかりと根拠のある説明がなされるよう準備していただくよう強く望む。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 JEAC4201 改定提案の際にはご指摘いただいた観点も踏まえて、一般の方々の理解が深まるよう説明を工夫したいと思います。【備考①】</p> <p>ご提案いただいた長時間側、低フラックス側のデータ取得についても、今後の検討の参考にさせていただきます。 【備考③】</p>

No.	質問項目	意見者	ご意見
8	改定案で想定する中性子照射に伴うミクロ組織変化及び遷移温度上昇のうち、今後解明を要すると考えられる照射脆化メカニズムに係る研究課題について	木村	<ul style="list-style-type: none"> ● $\Delta\sigma \propto \sqrt{V_f}$ の検証 ($\Delta\sigma \propto (\sqrt{V_f})/d$、$\Delta\sigma \propto \sqrt{(N \cdot d)}$) ● RPVS における微小クラスターの核生成と微小転位ループの相関 ● RPVS における転位ループの照射硬化における役割(貢献度:強化因子 α)の検証 ● RPVS における照射硬化・脆化の照射量依存性に及ぼす Mn, Si の影響 ● 各種 RPVS(A508, A533)の照射脆化感受性評価 ● APT 法における cluster size/number density 評価手法と硬度変化との相関 ● DBTT/USE/Hv 相関の照射量依存性 ● HAZ 部の監視試験における微小試験片技術の適用性評価 ● 国内監視試験結果の照射量依存性と予測式における Cu 濃度依存性
		阿部	現段階では特にありません。
		永井	<p>上記のコメントでも述べたように、</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 一律に溶質原子クラスターといつても、硬化への寄与には、組成依存性、欠陥集合体との複合体形成の有無などが大きく影響するはずで、それらの理解がより進むことが大切。 ● マトリックス損傷の本質の理解はとても大切な課題。アトムプローブ全盛になって以降、その結果は見た目に非常にわかりやすいため、研究が溶質原子クラスターに偏りすぎている印象。照射誘起クラスターの核にもなるマトリックス損傷の形成についての理解は不可欠。 ● ミクロ組織変化と硬化の関係は、どの材料にとっても永遠のテーマの一つであるが、現状は単に古典的モデルを使って、合った、合わないの議論のみである。もう少し転位運動のメカニズムに立ち戻って研究自体を再構築するなど、ブレークスルーが必要。線形モデル、非線形モデルの件も、この二つにこだわることなく、今後も様々な検討が必要。
		橋本	さらに突き詰めていくとするなら、計算科学がさらに進んだときに備えて、現段階で観察あるいは実証不可能と思われるものをできるだけ列挙しておくことと存じます。たとえば、量子論に立脚した不均一分布(電子のチャージデンシティなど)や原子間化学的相互作用が点欠陥の移動度に及ぼす効果、粒界を含めた点欠陥や不純物の局所的分布と粒界強度への影響などが思いつきます。
		福元	—

備考 : 課題について ①次回改定で検討する方針である短期的課題 ②研究や最新知見を踏まえ更に時間をかけて検討しなければならない中期的課題 ③より踏み込んだ専門的な研究が必要な長期的課題