

原子力設備の経年劣化と 予防保全

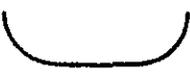
東京大学名誉教授

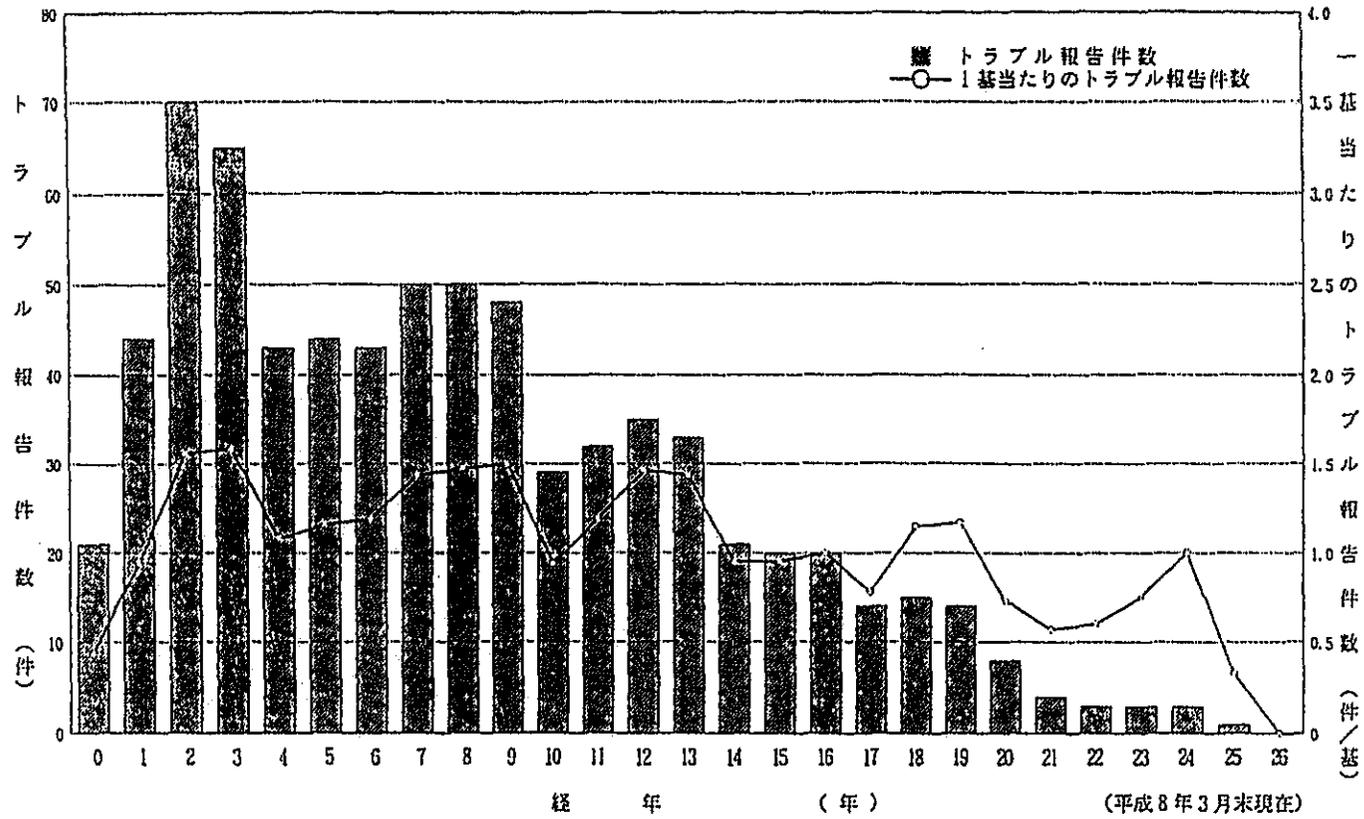
朝田 泰英

原子力発電所の高経年化とは

-1

- 運転開始後長期間経た後不具合が生じる。
例えば、故障率の増加
- 原子力発電所等の大型設備では、部品の交換、修理、改造等が行われる。
- 部品点数の多い設備では、故障率の時間推移は信頼性工学が教えるバスタブ曲線にならない。

故障率の傾向	故障率曲線	該当部品比率	該当部品の構成
当初高く、その後安定し再度増加する		4%	単純な部品
当初安定しており、その後増加する		2%	
わずかに増加し続けるが、顕著に増加しない		5%	複雑な部品
当初低いがやがて増加し、すぐに安定期に入る		89%	
使用時間にかかわらず一定			
当初高くその後安定する			



原子力発電所の経年別トラブル報告件数

原子力発電所の高経年化とは

-2

- 原子力設備を人体に例える事は誤解を生む。現象と時間尺度が違う。
- 個々の部品では物理現象としての寿命があるが、その集合体である設備には物理寿命はない。経済寿命で考えるべき。
- 運転開始後長期間を経た後に発生する不具合を材料の経年劣化として定性的に認識している。

経年劣化は環境のなせる技

- 力学環境、温度環境、化学的環境、放射線環境、複数環境因子の重畳
- 経年劣化の典型例---クリープ
- 多くの経年劣化現象は次のLarson-Millerパラメーターで整理できる。
- $LMP = T(\log t + C)$

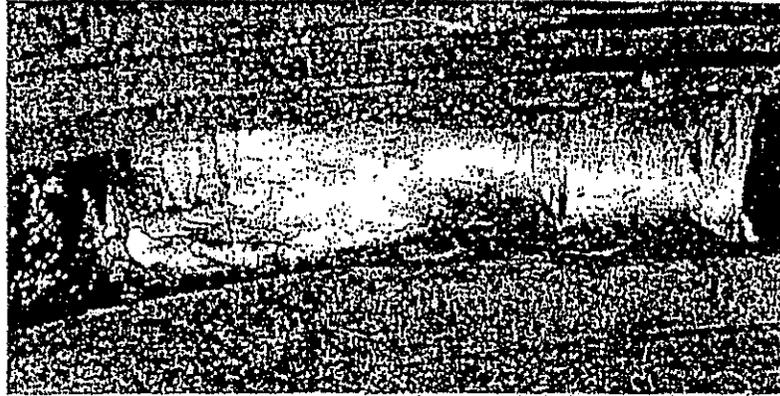


FIG. 8. Cracks in a high-pressure turbine cylinder.

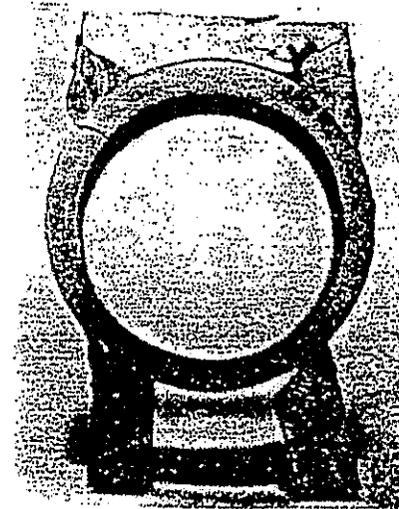
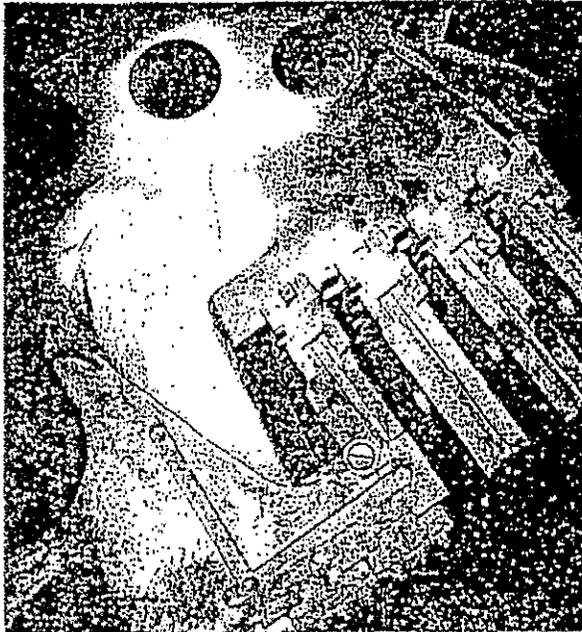
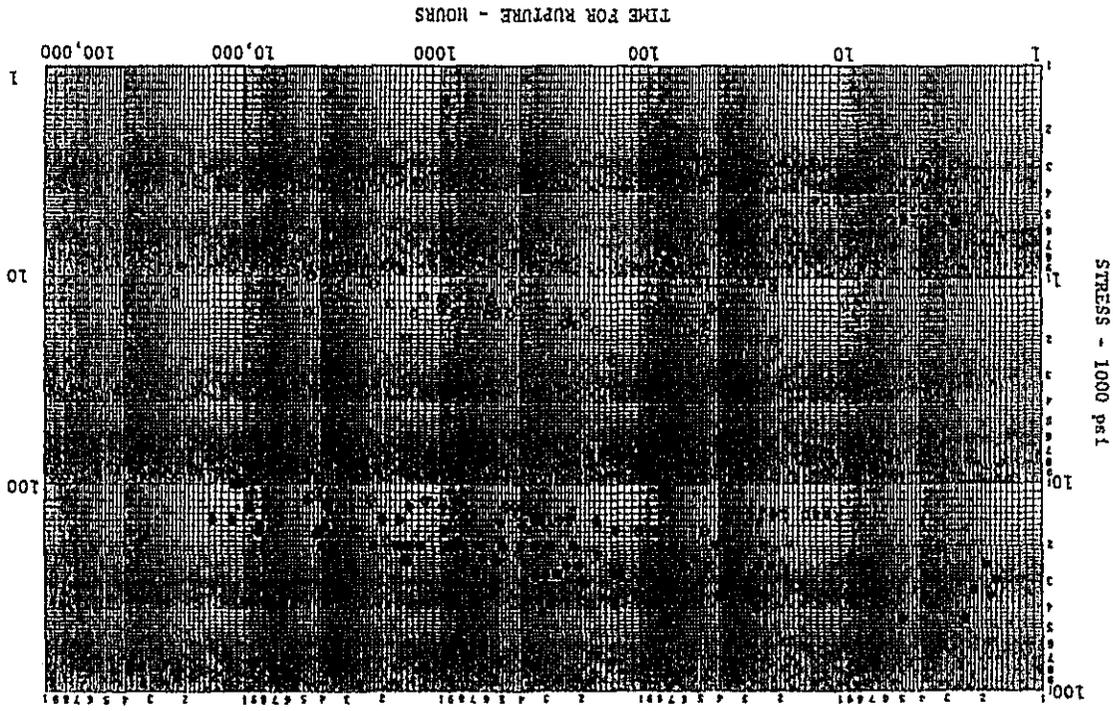


FIG. 3. Failure of superheater tube at attachment weld.

Fig. 10b Stress vs time for rupture; all data: 900 and 950 F



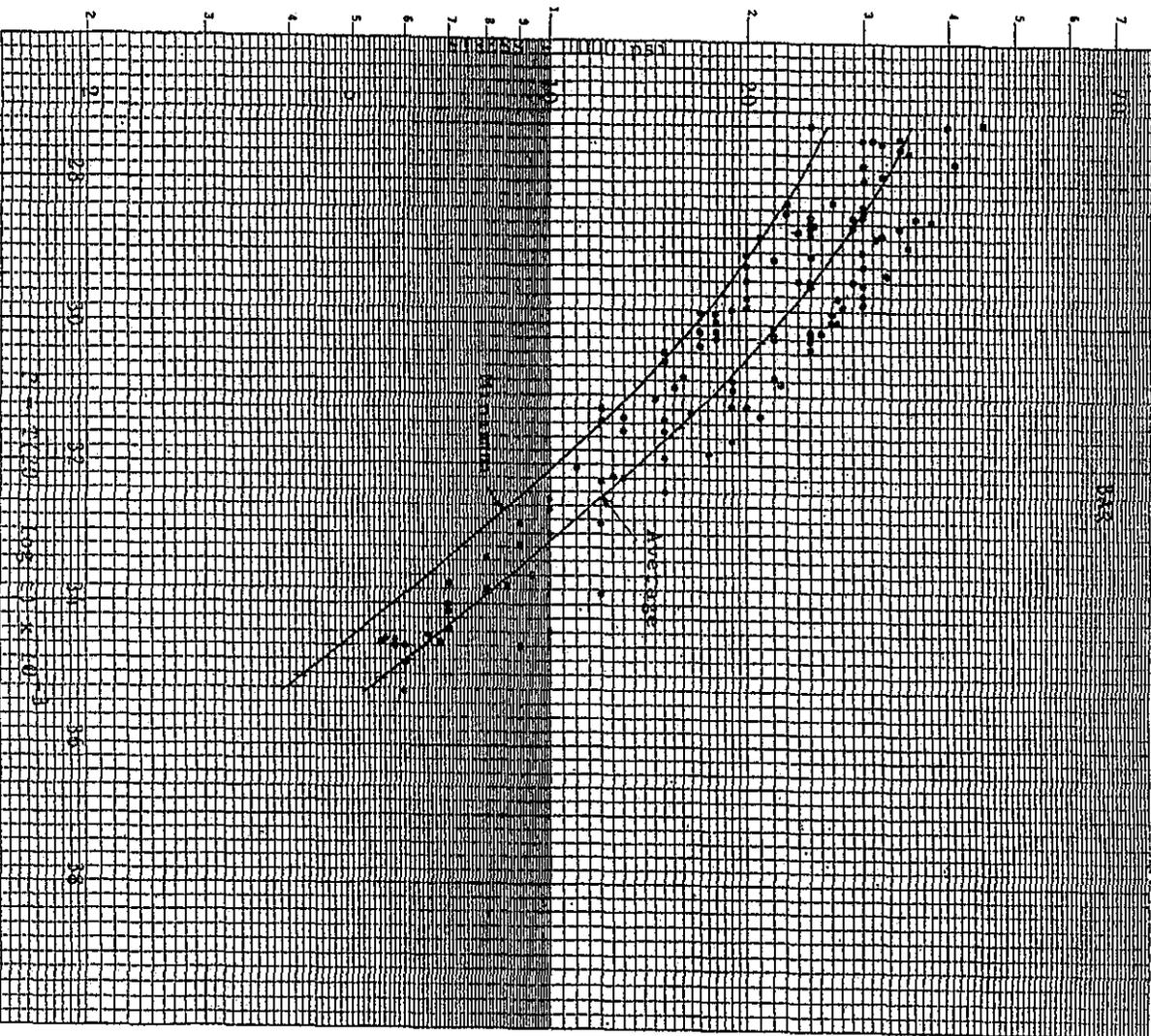


図2 クリープ試験データのパラメターによる整理

高経年化問題の技術的側面

- 材料の経年劣化現象の存在
- 長期間継続作用する外的要因の存在
- 発生機構の解明
- 予知、評価技術の開発
- 検査、監視技術と装置の開発
- 補修、交換、改造技術の開発

原子力発電の特殊性

- 工業製品は失敗の歴史の上に成立している。経験の産物である。
- 原子力設備では過去の経験が無い。
- 運転しながら経験し、これを技術向上に反映させる必要がある。

原子力発電所の寿命の考え方

- 米国に於ける運転認可
- 電力会社の申請に基づき米国原子力規制局(USNRC)が40年間の運転を許可した。
- これが発電所の物理寿命と誤解された。
- 運転認可期間40年の技術的根拠は不明
- 運転許可更新の審査(延長期間20年)

技術基準での扱い -1

- ASME Boiler & Pressure Vessel Code
Sec. III “Nuclear Power Plant Components”
- 経済産業省告示第501号「原子力発電所の構造等の技術基準」
- 軽水炉ではクリープが問題にならない低温
度で使用する。
- ステンレス鋼、高合金で425°C
- 炭素鋼、低合金鋼で 375°C

技術基準での扱い -2

- この上限温度ではクリープの影響を3000年間無視できると言われている。
- 延性材料の使用による脆性破壊の防止
- 塑性崩壊と過大な塑性変形の防止
- 低サイクル疲労を主要な破損事象に指定
- 過大な進行性変形の防止

技術基準での扱い -3

- これ以外の形態の設備の劣化事象は環境効果として扱う。
- これが経年劣化をもたらす要因。
- 環境効果は発電所毎に相違すると考え、共通規制項目とせず、電力とメーカーが協議して定める設計仕様事項とした。

ASMEの努力

- この考えが環境効果は無いとの誤解を生んだ。
- 実際には原子力発電設備に環境効果が無い訳ではない。
- この反省から、設計者に環境効果に配慮する事の重要さを認識させ、技術的検討を行わせる目的で、非強制の指針を1999年に制定した。

Non-Mandatory Appendix W -1

- W-1000 設備の環境効果
 - 1100 序論
 - 1200 Sec.XI及び長寿命化への応用
- W-2000 腐食損傷機構
 - 2100 粒界及び粒内型応力腐食割れ
 - 2200 全面腐食及び減肉
 - 2300 孔食

Non-Mandatory Appendix W -2

- 2400 隙間腐食及び損耗
- 2500 粒界腐食
- 2600 微生物腐食及び汚れ
- 2700 腐食疲労と亀裂進展
- 2800 流体促進腐食
- 2900 浸食及び腐食浸食

Non-Mandatory Appendix W -3

- W-3000 脆化損傷機構
 - 3100 照射促進応力腐食割れ
 - 3200 熱時効
 - 3300 照射脆化
 - 3400 水素脆化

Non-Mandatory Appendix W -4

- W-4000 その他の損傷機構
 - 4100 フレツティング及び摩耗
 - 4200 熱疲労
 - 4300 動的荷重(振動、水撃、不安定流動)
 - 4400 クリープ

Non-Mandatory Appendix W -5

- 各節の構成

W-@@10 事象の説明

W-@@20 材料の観点からの注意事項

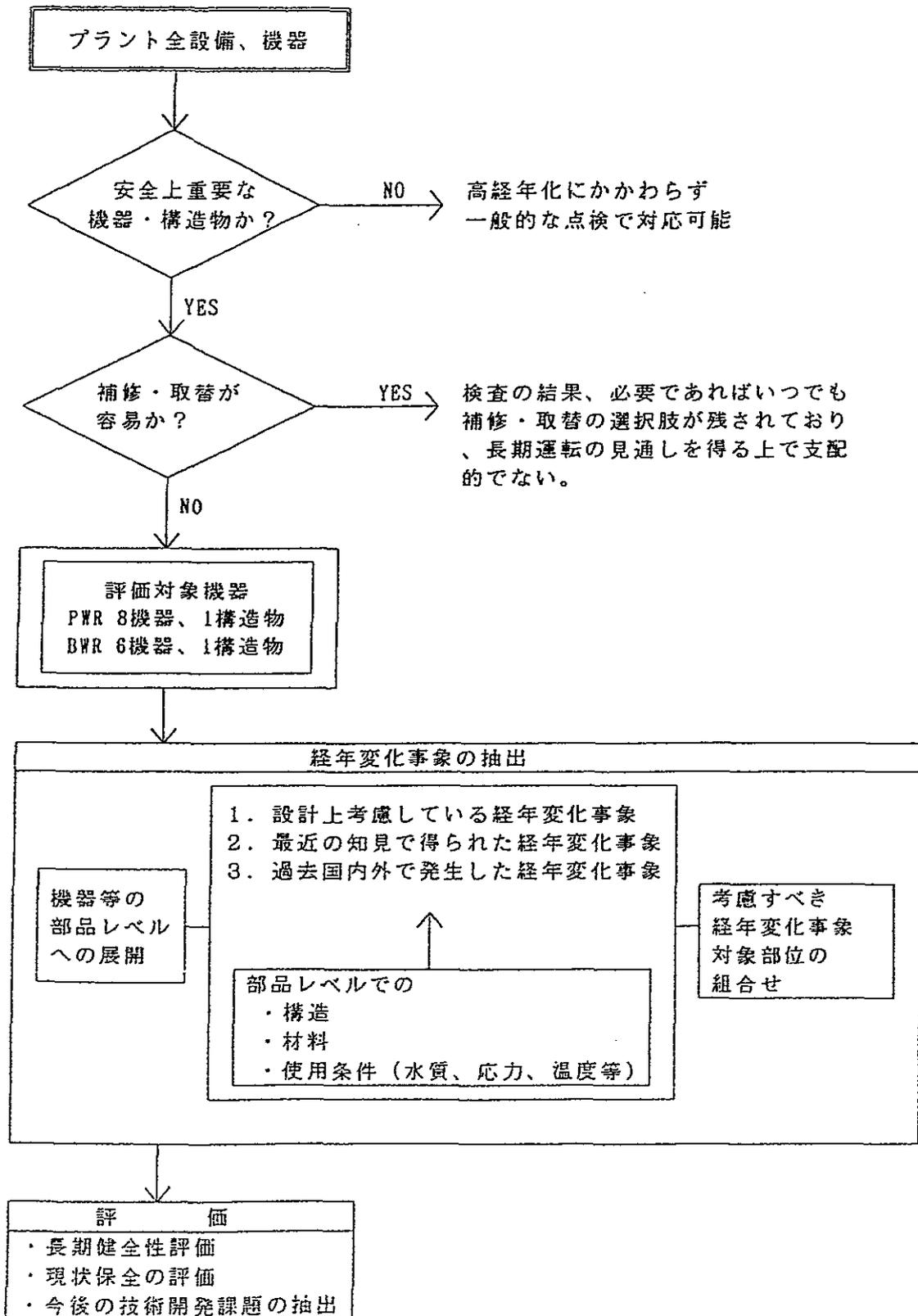
W-@@30 設計の観点からの注意事項

W-@@40 影響軽減及び防止対策

W-@@50 参考資料

国の高経年化対策

- 1996年4月第一次報告書
- 1999年2月第二次報告書
- 経年劣化要因と対象部位の抽出、及び、健全性を検討した。
- これに基づき将来の重要研究開発課題を指摘
- 第一次検討の方法と研究開発課題



分 類	技 術 開 発 課 題
検査・モニタリング技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱時効材料モニタリング技術の開発 ・ ケーブル・コンクリートの非破壊劣化診断技術の開発
予防保全・補修技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内構造物の補修・取替技術の実証 ・ 表面改質技術⁽²⁸⁾の有効性確認
経年変化評価技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中性子照射脆化に対する評価手法の整備（上部棚領域） ・ 使用環境を考慮した疲労評価手法の確立 ・ 熱時効事象に対する評価手法の整備

国の研究開発

- IASCC、Cable、コンクリート遮蔽機能の経年劣化に関する国家プロジェクト
- 保修技術開発（保修技術実証試験）
- 欠陥評価技術（SAF、IAF）
- 劣化機構解明技術（PLIM）
- 環境疲労（EFT）
- 国の研究開発成果は技術基準に反映

民間の自主的研究開発

- 保全研究分科会(日本機械学会)
- 弾塑性配管耐震設計指針(火原協会)
- 発電用設備規格委員会(日本機械学会)
- ASME検討会(火原協会)
- Ke検討会(火原協会)
- Risk Base検討会(火原協会)

国と民間の協力による研究開発

- 熱疲労防止指針策定 (METI-JSME)
- 原子力設備維持規格 (METI-JSME)
- 高経年化技術センター (METI-JAPEI)
- 高経年化技術検討委員会 (JAPEIC)
- Nuclear Component Aging Project (DOE-EPRI、米国)

規格の高度化と規制の適正化

- 規格基準の整備、高度化の必要性
- 規制活動、事業者活動の透明性確保
- 規格基準の体系的整備と高度化
- 経験の速やかな反映
- 過剰規制はモラル低下を招く
- 規格改訂遅れは技術の発展を阻害する

高経年化技術検討委員会

- 高経年化技術センター(PLEC)
- H12国の委託により設置
- 発電設備技術検査協会が担当
- 高経年化対策技術開発の効果的推進
- 高経年化技術検討委員会は中立、専門の立場でPLECに指導、助言を行う

委員会の構成と活動

- 技術開発部会と成果活用部会からなる
- 技術開発マップと技術基準マップ
 - ー設備に予想される技術課題と技術基準の一覧表
- 長期研究開発計画
 - ーマップに基づき緊急、重要を判断、実施計画立案

委員会の目標

- 重要度、緊急度の高い技術項目の指定
- 全日本としての技術開発体制の構築
- 国内外状況変化に即応し内容体制見直し
- 高経年化技術開発の効果対投資比向上
- 研究成果の技術基準への反映

民間の自主的規格策定活動

- 炉内構造物点検評価指針
- 環境疲労評価指針
- 簡易弾塑性解析指針
- 有限要素法詳細解析応力分類指針
- システム化規格

国際協力による課題解決

- 米国との協力 – USNRC, DOE, EPRI, NEI, ASME
- 欧州との協力 – EC-JRC
- 中国、韓国との協力も将来必要になる
- 課題に関する世界共通認識の形成
- 技術的資源、経費の節約と時間短縮

ASMEの規格化活動

- 規格標準評議会 (CC&S)
- 原子力規格理事会 (BNCS)
- 国際規格理事会 (BIS)
- ボイラー-圧力容器規格委員会 (B&PVC)
- 原子力建設規格小委員会 (SC. III)
- 原子力供用期間中検査小委員会 (SC.XI)

これら委員会には日本人が委員で参加

ASME規格活動の理念

- 中立、公正、公開、専門性、合意の原則
- 世界的普遍性のある規格制定が目標
- 規制、事業者、中立から均衡した委員参加
- 民間規格活動は法により規定
 - National Technology Transfer Act
 - Standard Development organization Act

国際協力による規格高度化

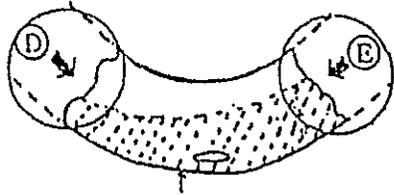
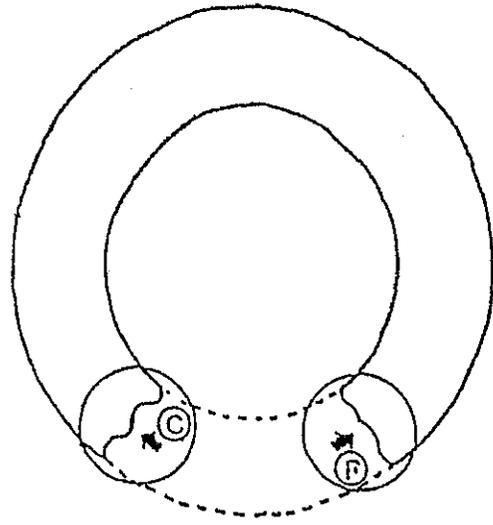
- 課題に関する認識の国際共通化
- 普遍性のある国際共通規格策定
- 局部的特殊性の相互認識と理解
- 規格策定の資源と時間の節約
- ISO/TC11 SIPECS計画

補遺

- 力学的要因による損傷例
- 力学要因と化学要因の複合
- 熱的要因の例
- 中性子照射要因及びその複合
- 材料の改善
- 力学環境の改善
- 交換、化学環境の改善

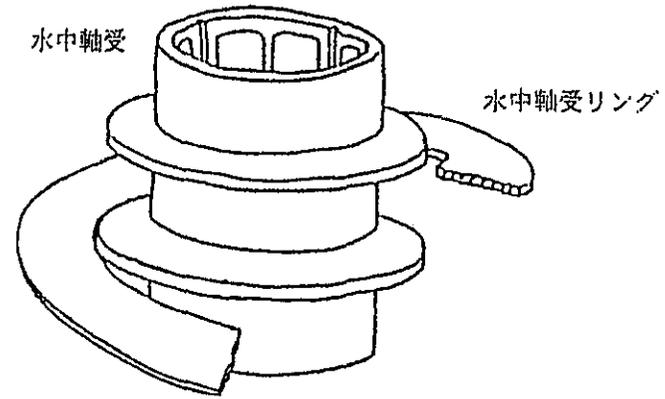
力学的要因による損傷例

- 低応力高サイクル疲労
 - * 福島第二発電所3号炉再循環ポンプ
 - * 配管損傷の調査例(米国の場合)
- 熱成層(熱流体要因との複合)
 - * 玄海発電所1号炉給水戻り配管
- 熱疲労(熱流体要因との複合)
 - * 敦賀発電所2号炉再生熱交換器連絡管



斜線部は外側から向かって
うすくなっている。

軸受リング（上から見た図）



*PIPING FAILURES BY FAILURE MECHANISM
(PIPING NON-LEAKING CRACKS/WALL THINNING, LEAKS, FAILURES,
RUPTURE/SEVERANCE, TOTAL 4064)*

FAILURE MECHANISMS (<500 INCIDENTS/MECHANISM)

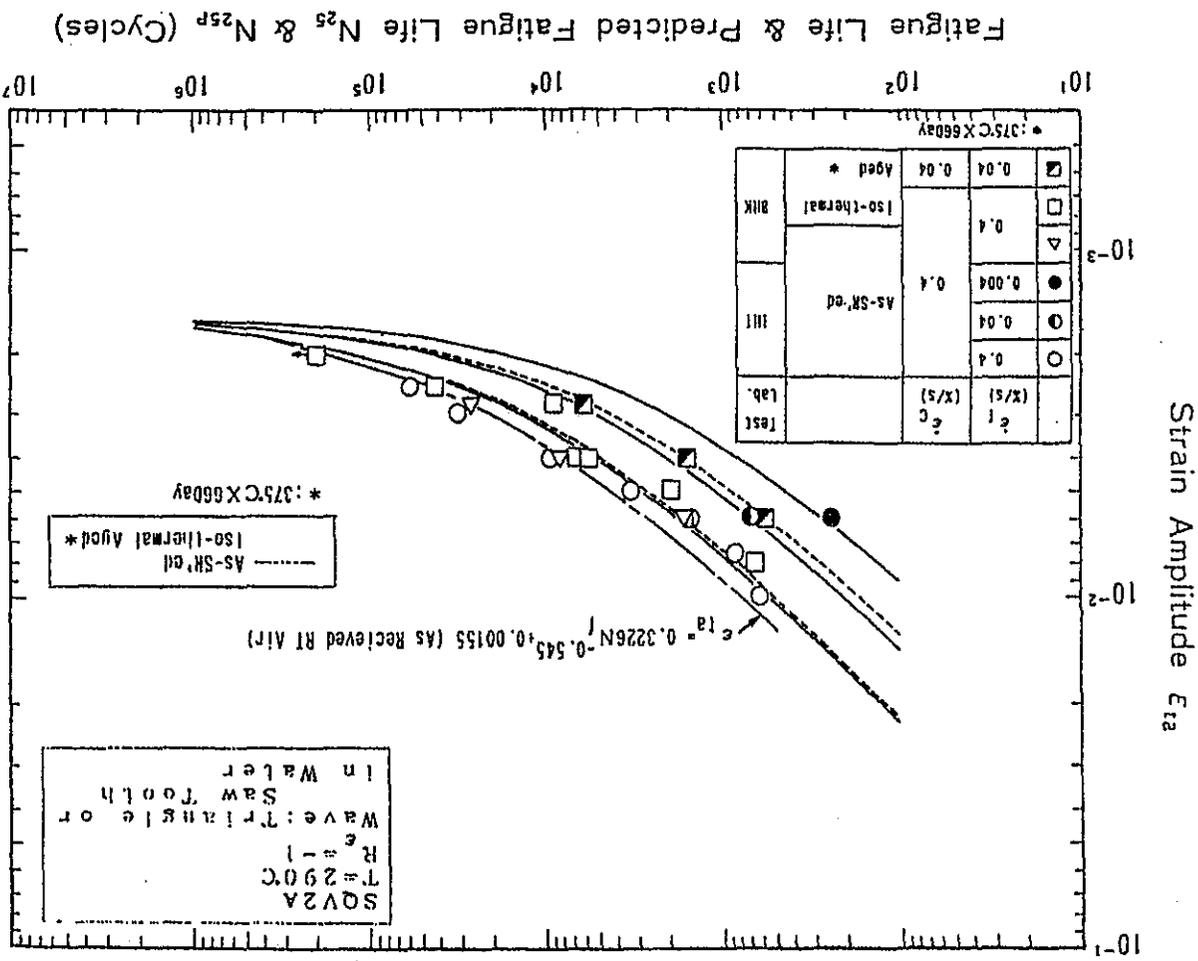
<i>AGING</i>	<i>23</i>
<i>CORROSION</i>	<i>209</i>
<i>CONSTRUCTION/FABRICATION DEFECTS/ERRORS</i>	<i>326</i>
<i>DESIGN ERRORS</i>	<i>34</i>
<i>MECHANICAL DAMAGE</i>	<i>22</i>
<i>WEAR</i>	<i>27</i>
<i>WATER HAMMER</i>	<i>37</i>
<i>NOT SPECIFIED</i>	<i>393</i>

FAILURE MECHANISMS (>500 INCIDENTS/MECHANISM)

<i>FLOW-ASSISTED CORROSION (FAC)</i>	<i>1003</i>
<i>FATIGUE</i>	<i>636</i>
<i>STRESS CORROSION</i>	<i>1354</i>

力学要因と化学要因の複合

- 水環境中疲労
 - * 実例は未だ経験されていないが可能性があり研究中
- 浸食による減肉
 - * 米国Surry#2の2次給水配管で発生
- 粒界型応力腐食割れ
 - * 304鋼溶接部で多発、対応方法は完成



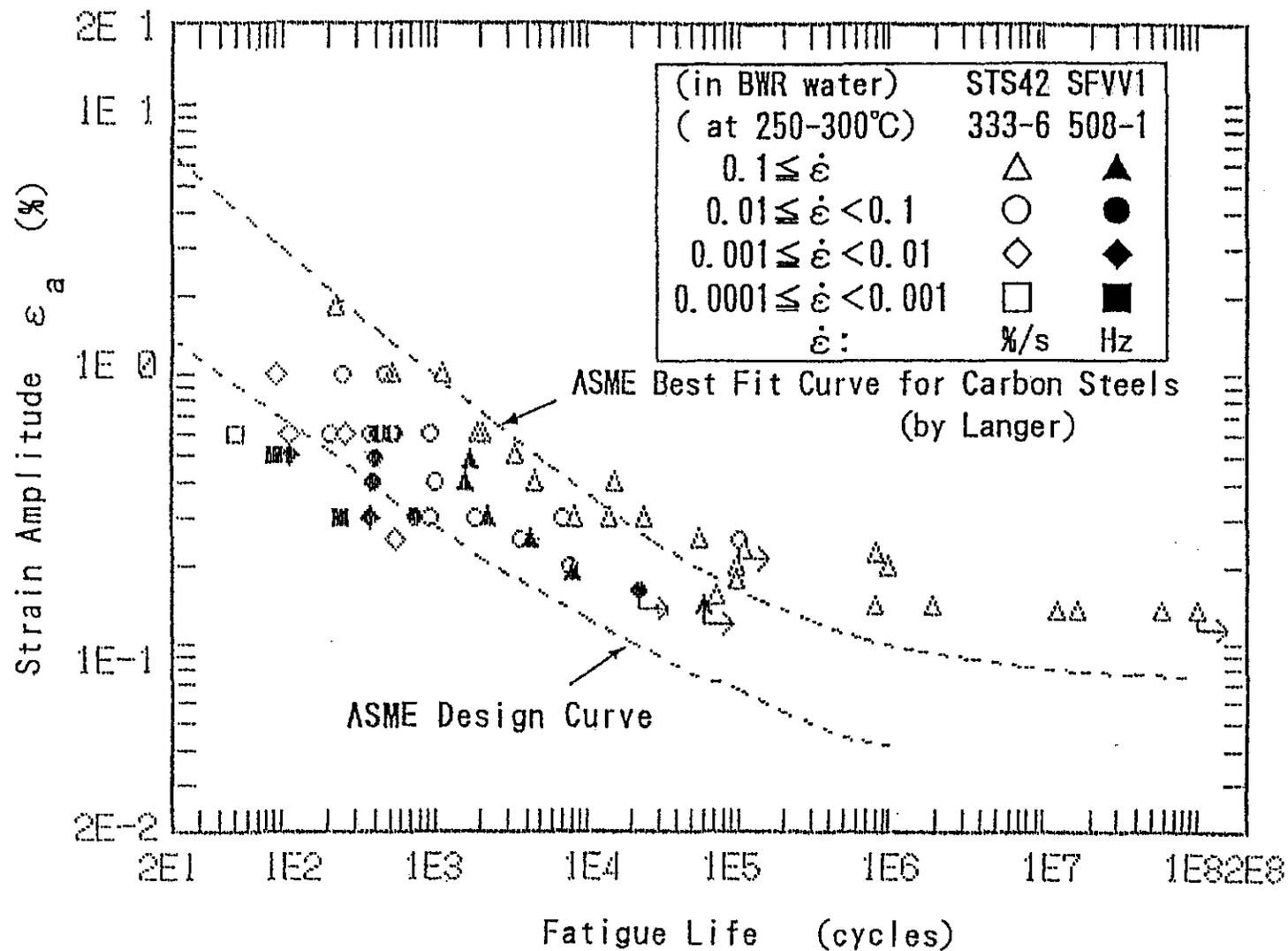
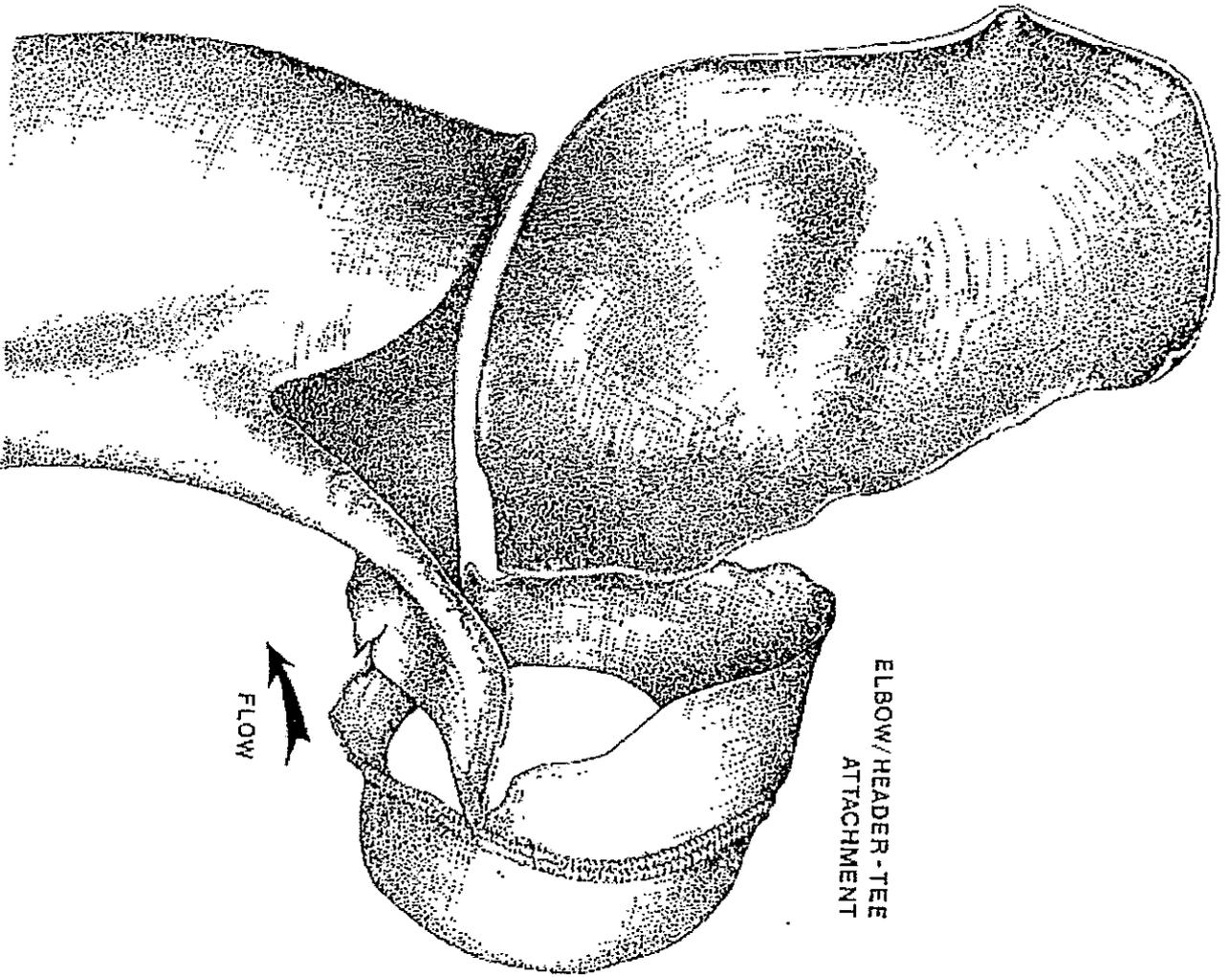


Fig.1 Fatigue data of carbon steels in high temperature pure water environment.



ELBOW/HEADER-TEE
ATTACHMENT

FLOW

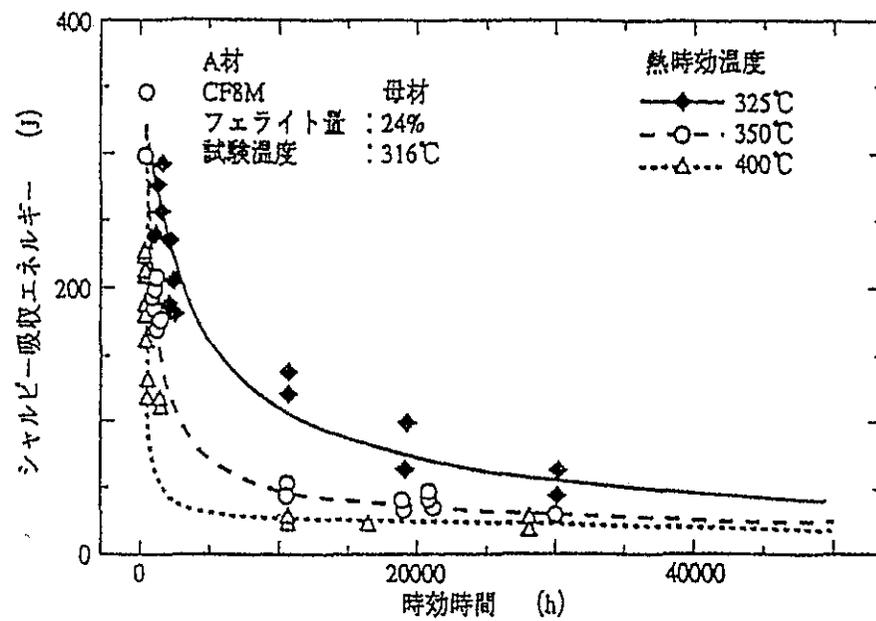
熱的要因の例

- 熱脆化

- * 実例は未だ観察されていない。劣化要因としての可能性検討中。

- 二相ステンレス鋼の熱脆化

- * 実例は未だ観察されていない。劣化要因としての可能性検討中。



熱時効による吸収エネルギー変化(A材、試験温度: 316°C)

中性子照射要因及びその複合

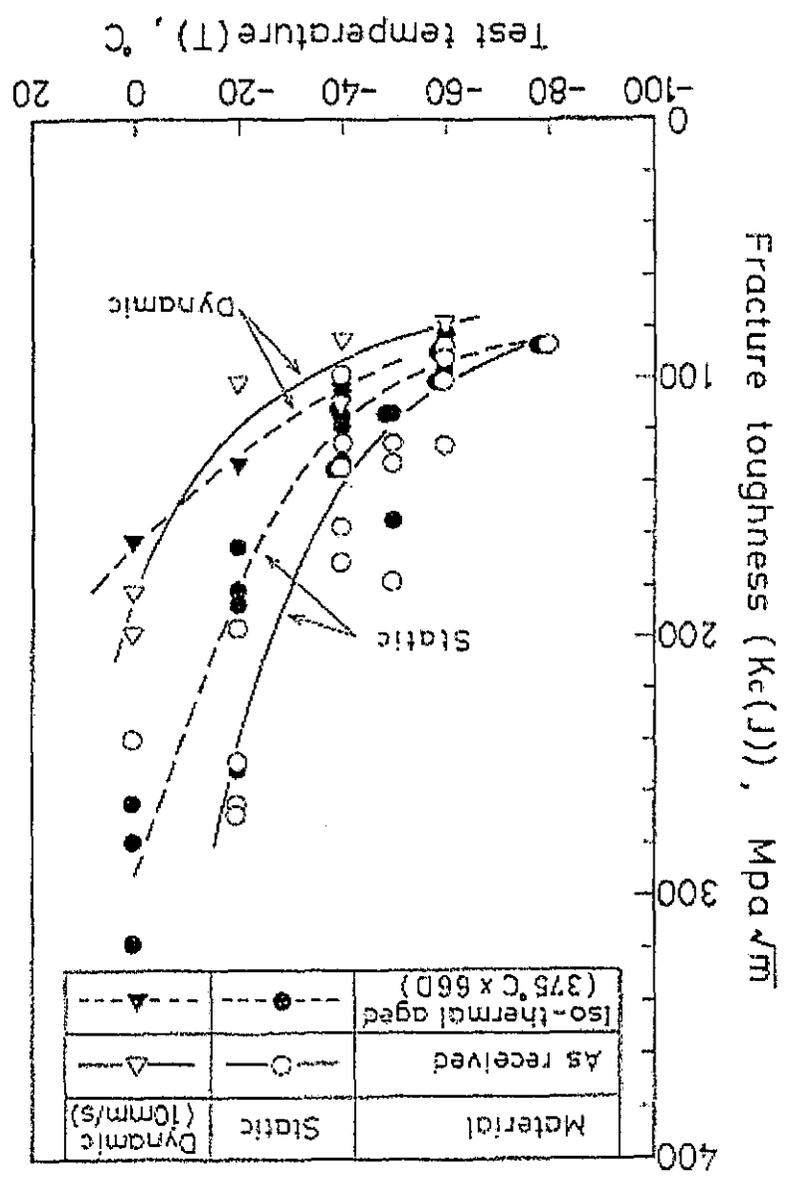
- 照射脆化

- * 中性子照射により延性脆性遷移温度が上昇する。材料中の不純物元素の影響。研究開発継続中。

- 照射促進応力腐食割れ (IASCC)

- * 今後の重要劣化要因として国家プロジェクト研究開始。

Relation between static and dynamic fracture toughness (K_{Ic} (J)), and test temperature



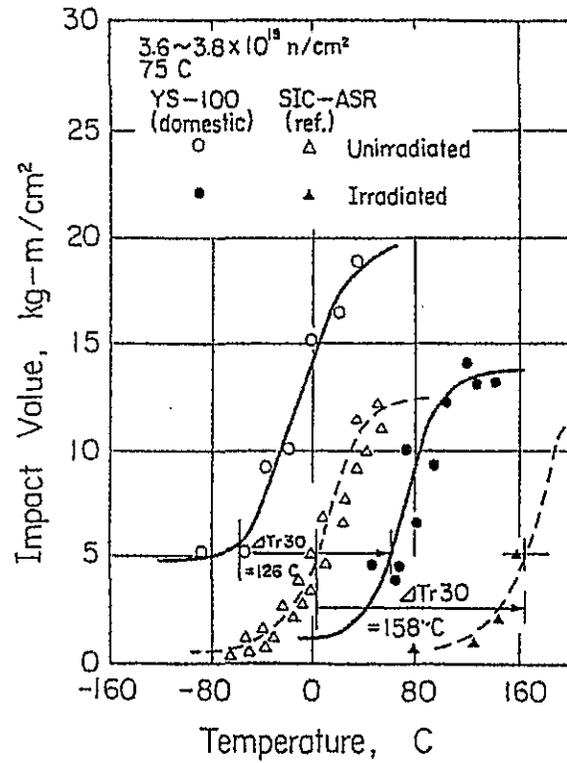


FIG. 5—Comparison of transition temperature shifts in Japanese domestic A302B steels and ASTM reference steels.

材料の改善

- 316NGステンレス鋼の開発
 - * 低炭素中窒素含有量による粒界鋭敏化防止
 - * 耐SCC材料として日本で開発された。
 - * SCC発生が懸念される部位に使用。
 - * 旧材料と交換進行中。

SUS 316 NG鋼の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
JIS SUS 316	0.08	1.0	2.0	0.040	0.030	10.00	16.00	2.00
規格値	以下	以下	以下	以下	以下	~	~	~
						14.00	18.00	3.00
SUS 316 NG (最新プラント 材料の一例)	0.02	0.68	0.73	0.016	0.001	12.18	17.32	2.10

力学環境の改善

- 共振の回避
 - * 告示501号に流体励起振動防止を規定
- 水冷溶接の開発による残留応力改善
 - * SCC対策工法として日本で開発、表面の残留応力を圧縮に変える事によりSCCを防止。

交換、化学環境の改善

- 蒸気発生器の交換
- PWR圧力容器蓋の交換
- BWR炉内構造物(シュラウド)の交換
- BWR炉内構造物(ICM案内管)の交換
- Noble Metal Coating
- 水素注入