

PWR1次系SUS配管粒界割れ

亀裂発生メカニズム/亀裂有り健全性評価に関する 研究計画全体工程と2022年度実施事項について

2023年3月2日

＜本事象に対する認識＞

- ▶ 大飯3号加圧器スプレイライン溶接部で粒界割れの事象（以下「大飯3号粒界割れ事象」）が発生したが、PWRの1次系水質環境下におけるステンレス鋼の溶接熱影響部の粒界割れは、実機事例が極めて少ない事象である。また、過去のラボ試験においても、進展データは複数存在するものの、発生データについては極めて少ない状況である。
- ▶ 大飯3号粒界割れ事象については、溶接および形状に由来する硬さと高応力に拠る割れと特定されたものの、実機事例が極めて少ない事象であることから、今後の既設発電所の安全性・信頼性を確保するため、産業界で取組むべき共通的技术課題であると認識している。
- ▶ そこで、産業界の組織・専門家と連携して「粒界割れワーキンググループ（WG）」を立ち上げ、また、その検討に国内外の有識者意見を反映しながら進めることで、知見拡充に鋭意取り組んでいる。

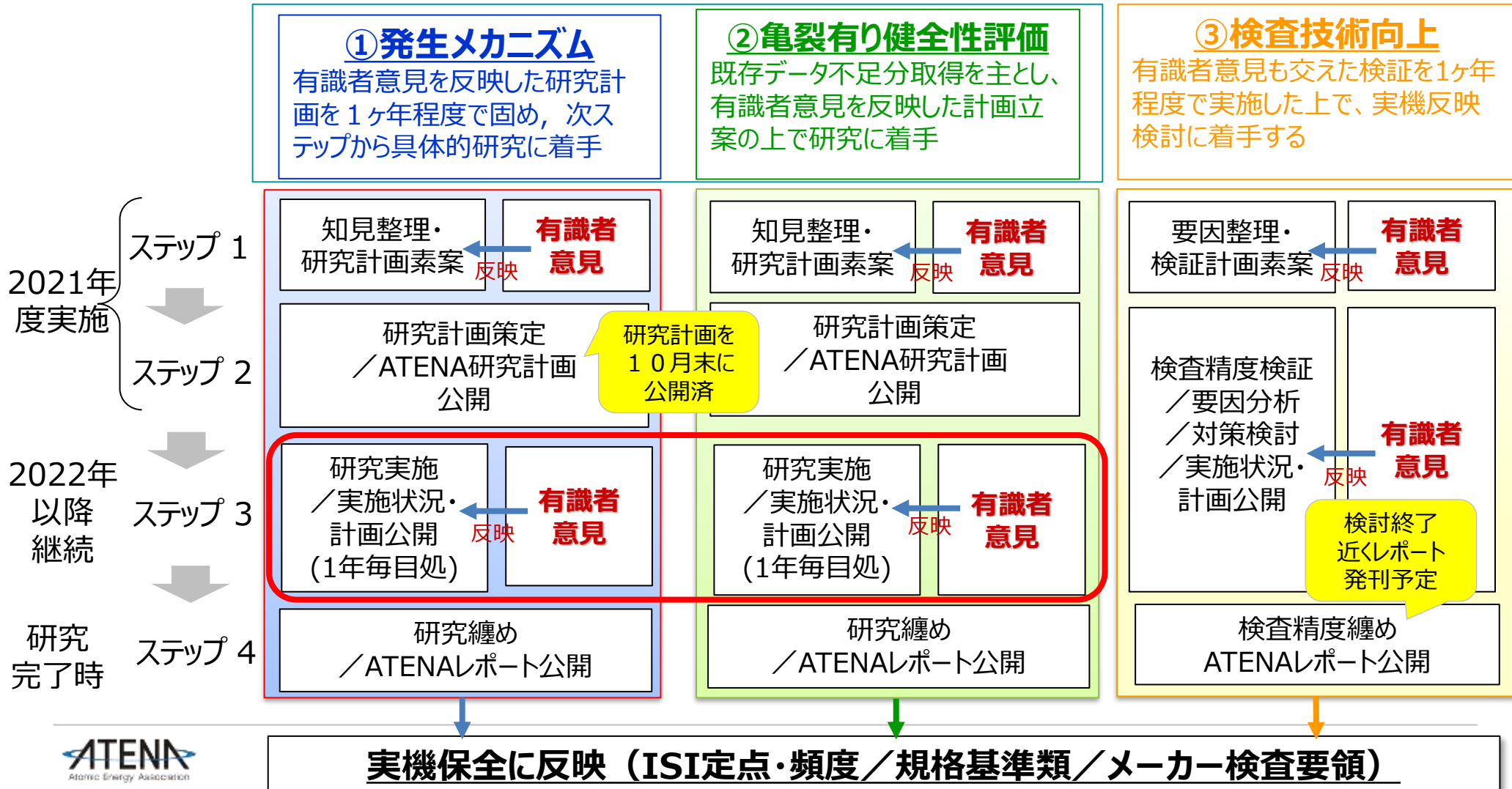
課題認識

- 規制当局と関西電力(株)の公開会合を踏まえ、技術課題は大きく分けて「①発生メカニズムの解明」、「②亀裂がある場合の健全性評価」、「③検査技術の向上」の3分類あると現時点で整理している。

	①発生メカニズム	②亀裂有り健全性評価	③検査技術向上
現時点での 主な課題 認識	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 「硬さ」「硬さ以外」各々で割れの要因の再整理 ➤ 「硬くなる要因」は何か (機械加工,溶接,形状,...) ➤ 発生メカニズム自体の探求 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 亀裂有り健全性評価に用いるデータの拡充 <ul style="list-style-type: none"> ・亀裂進展速度 ・亀裂進展評価／亀裂有り健全性評価に用いる応力 ➤ 亀裂進展後の亀裂有り健全性評価手法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 亀裂性状把握技術 及び その関連検査技術の向上

検討のアプローチ

- 外部専門家御意見も反映して2021年度に策定した研究計画に基づき、今年度から具体的研究に着手している。



亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する 研究計画

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施工程～

実施項目		2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
0. 研究計画の策定		■				
1. 最新知見の調査			■	■	■	■
亀裂発生メカニズム解明	2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）		実機損傷/健全部位	モックアップ		
	(1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD） (1)-②断面マクロ硬さ測定 (2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS) (2)-②潜在き裂の調査(SEM/EDS) (3)被膜分析、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）		■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	
3. 発生特性に関する調査				■	■	■
亀裂有り構造健全性評価の確立	4.(1) SCC進展特性知見の調査		■			
	4.(2) SCC進展特性データの取得			■	■	■
	4.(3) SCC進展速度線図案の策定				■	■
	5. 溶接残留応力評価				■	■
	6.(1) 構造健全性評価					■
	6.(2) LBB成立性の検討					■
7. 技術基盤の整備					■	■

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[1/4]～

外部専門家コメントを踏まえ、現状認識に対し必要な対応と実施項目の詳細を示す。

後続検討に影響を与える亀裂の発生メカニズム・原因をまず確定すべく、実施項目のうち優先度の高いものを2022年度より着手している。

<最新知見の調査>

項目	概要
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 仏国PWRの安全注入系配管のSCC事例等、継続的に最新知見を調査し、研究計画に反映する。
実施項目	1. 最新知見の調査 (2022年度～)

<亀裂発生メカニズム・原因>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 溶接熱収縮による硬化が亀裂発生の原因と考えているが、硬化により粒界割れに至る知見が不足。 亀裂発生形態（単一or 複数亀裂の発生）に関する知見が不足。 亀裂発生機構はSCCが有力との認識だが微小な潜在亀裂が存在した可能性を否定できていない。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 実機損傷部位や健全部（含むモックアップ）に対する下記の調査を行い、既往知見の調査結果と併せて、亀裂発生メカニズム・原因の特定を行う。 具体的には、亀裂が生じた粒界近傍での局所的な歪や硬さ、特異な残留応力等が生じた可能性について、事業者調査では実施しなかったEBSD等も用いて実機（含むモックアップ）に対する詳細調査を実施し、硬さ、もしくは硬さ以外の粒界割れ発生要因を調査する。 併せて、SEM、EDS等を用い、微小な潜在亀裂等の初期欠陥の有無を調査する。
実施項目	2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位） (2022年度～) <ul style="list-style-type: none"> (1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD） (1)-②断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得） (2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS) (2)-②潜在き裂の調査(SEM/EDS) (3)被膜分析、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[2/4]～

<亀裂発生条件>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂発生メカニズムがSCCであったとしても、その発生条件の明確化が必要。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 前項に示す実機詳細調査により亀裂発生メカニズム・原因を特定しつつ、その発生条件を明確化する。
実施項目	2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）（前表記載内容を通じて明確化）（2022年度～）

<亀裂発生特性>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> SCC発生特性（発生時間と作用応力の関係）に関する知見が不足している。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 電力共通研究等、SCC発生特性に関する知見に関し、調査を実施する。 本項は、実機詳細調査による亀裂発生メカニズム・原因を見極めた上で、実施する。
実施項目	3. 発生特性に関する調査（2023年度～）

<SCC進展特性>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> PWR1次系環境下のSCCの進展特性は、硬化度（加工度）・応力・高温条件が加速因子である事等、一定の知見は取得されている。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> SCC進展特性に関し得られている既往知見が、本事象の条件（進展速度・進展経路）を十分に網羅できているか調査する。 その進展特性知見の調査結果を踏まえ、必要に応じ本事象の条件に合致するSCC進展データの取得を行う。
実施項目	4.(1)SCC進展特性知見の調査（2022年度～） 4.(2)SCC進展特性データの取得（2023年度～）

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[3/4]～

<SCC進展評価>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> SCCに対する基本的な亀裂進展評価手法は確立されている一方、維持規格にPWR1次系環境中のSCCに対する亀裂進展速度線図は整備されていない。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> SCC進展特性の項目で整理したSCC進展データを基に、SCC亀裂進展速度線図案を策定する。
実施項目	4.(3)SCC進展速度線図案の策定（2024年度～）

<残留応力評価>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 溶接残留応力の基本的なFEM解析手法は国プロIAFで整備されている一方、詳細な当該部位の条件を押さえた残留応力分布は得られていない。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 本検討で得た実機詳細調査結果を考慮に入れつつ、当該部位の条件を当てはめ、溶接残留応力分布を解析的に得る。
実施項目	5.溶接残留応力評価（2024年度～）

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[4/4]～

<健全性評価>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 当該部位に関する暫定的な健全性評価は事業者調査時に実施されているが、本検討で得られた知見を反映した健全性評価を実施する必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 本検討で得た実機詳細調査結果とそれを基にした残留応力評価、SCC進展特性知見等を用い、亀裂進展評価と破壊評価による健全性評価を実施する。
実施項目	6.(1)構造健全性評価 (2024年度～)

<破断前漏えい(LBB)の評価に対する知見拡充>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 今後、仮に亀裂が存在した場合のLBBに対する裕度に関し更なる知見拡充を進める必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 今後、仮に亀裂が存在したとしても、その亀裂が破損に繋がらないよう管理することが重要である。そこで、SCC進展、破壊評価を高度化しLBBに対する裕度を明確にする。
実施項目	6.(2)LBB評価に対する知見拡充 (2024年度～)

<技術基盤の整備>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 粒界割れの水平展開部位に対し、向こう3年間を目途に超音波探傷検査を毎年実施している。 本検討成果を反映した健全性評価手法を確立する必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 本検討の成果を基に、検査範囲の明確化を図り、検査・健全性評価手法の技術基盤を整備する。
実施項目	7. 技術基盤の整備 (2024年度～)

參考資料

✓ 56基のPWR (1970 s -1990 s) が存在

<プラント>

0/32基 : 約900 MW (CP0, CPY)(78-87年)

Chinon-B3 → 指示は溶接欠陥

5/20基 : 約1300 MW (P4, P'4)(84-93年)

Penly-1, Cattenom- 1/3,
Flamanville-2, Golfech-1

4/4基 : 約1450 MW (N4)(96-99年)

Civaux-1/2, Chooz-B2/B1

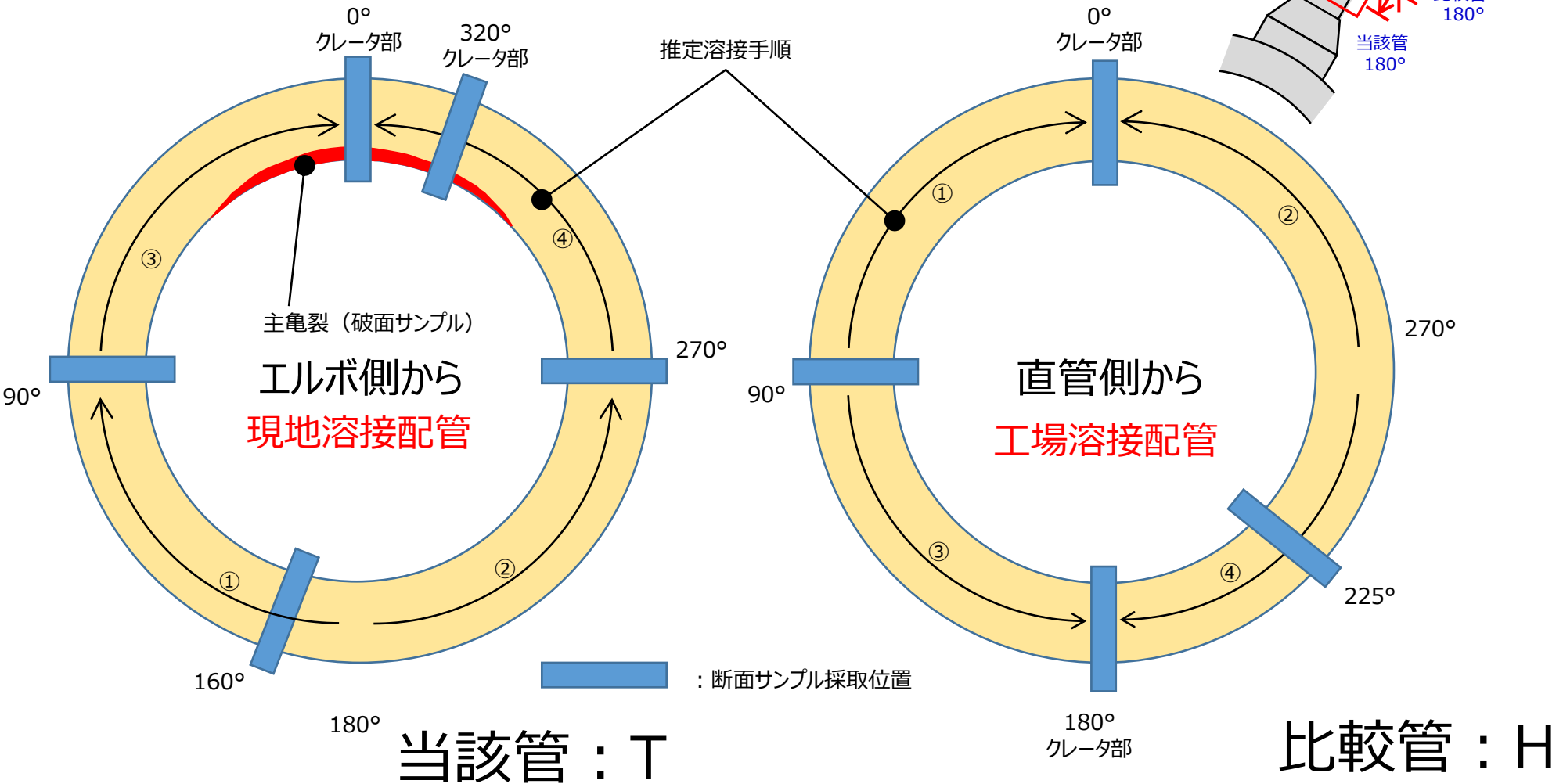
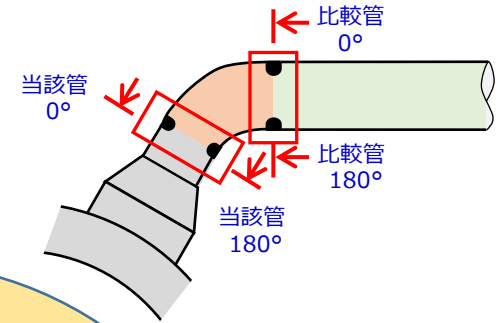
<部位>

RIS(SIS)配管とRHR配管の溶接熱影響部

- 特定の設計 (新しいプラント) に欠陥が集中している。

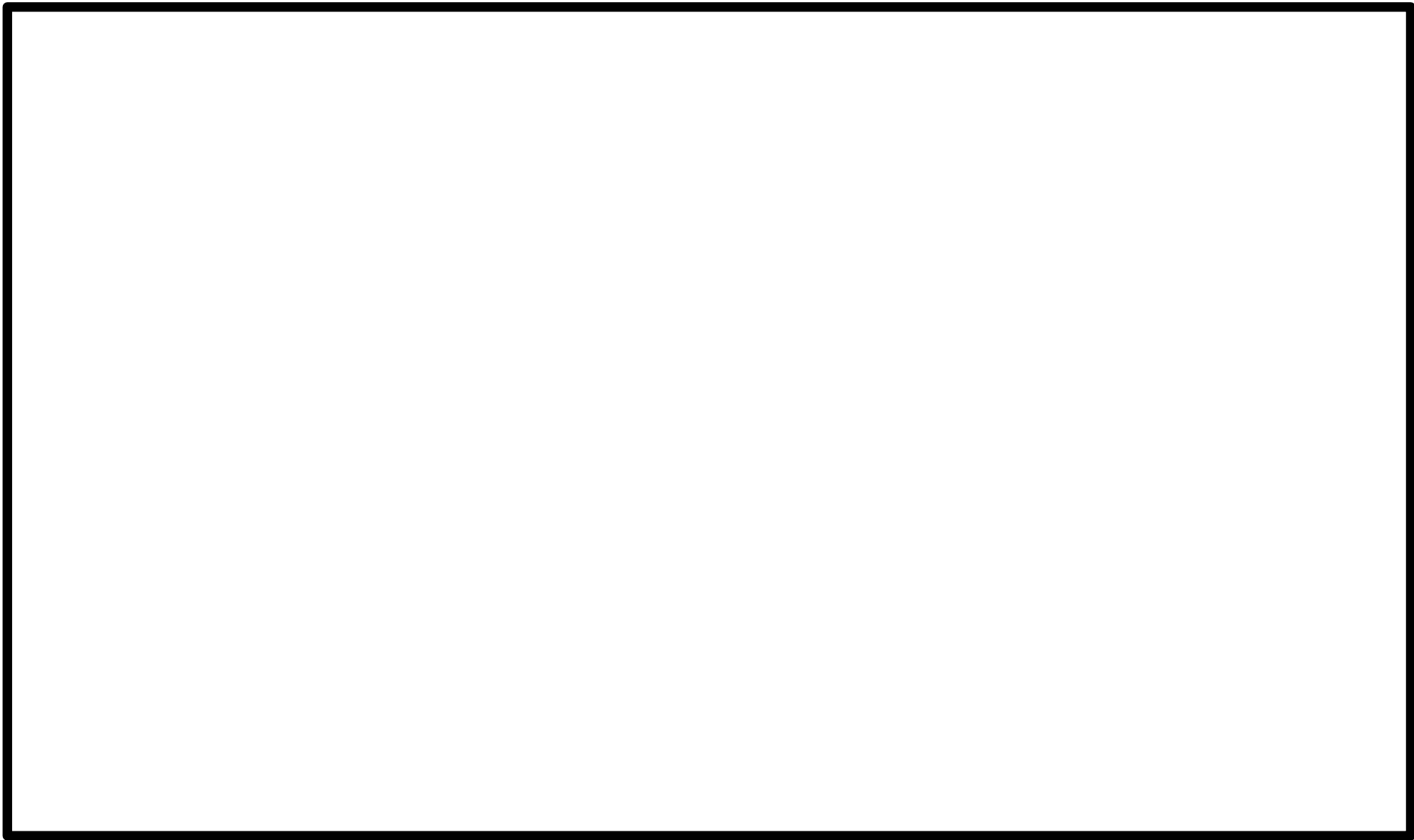


配管残材からのサンプル採取イメージ図



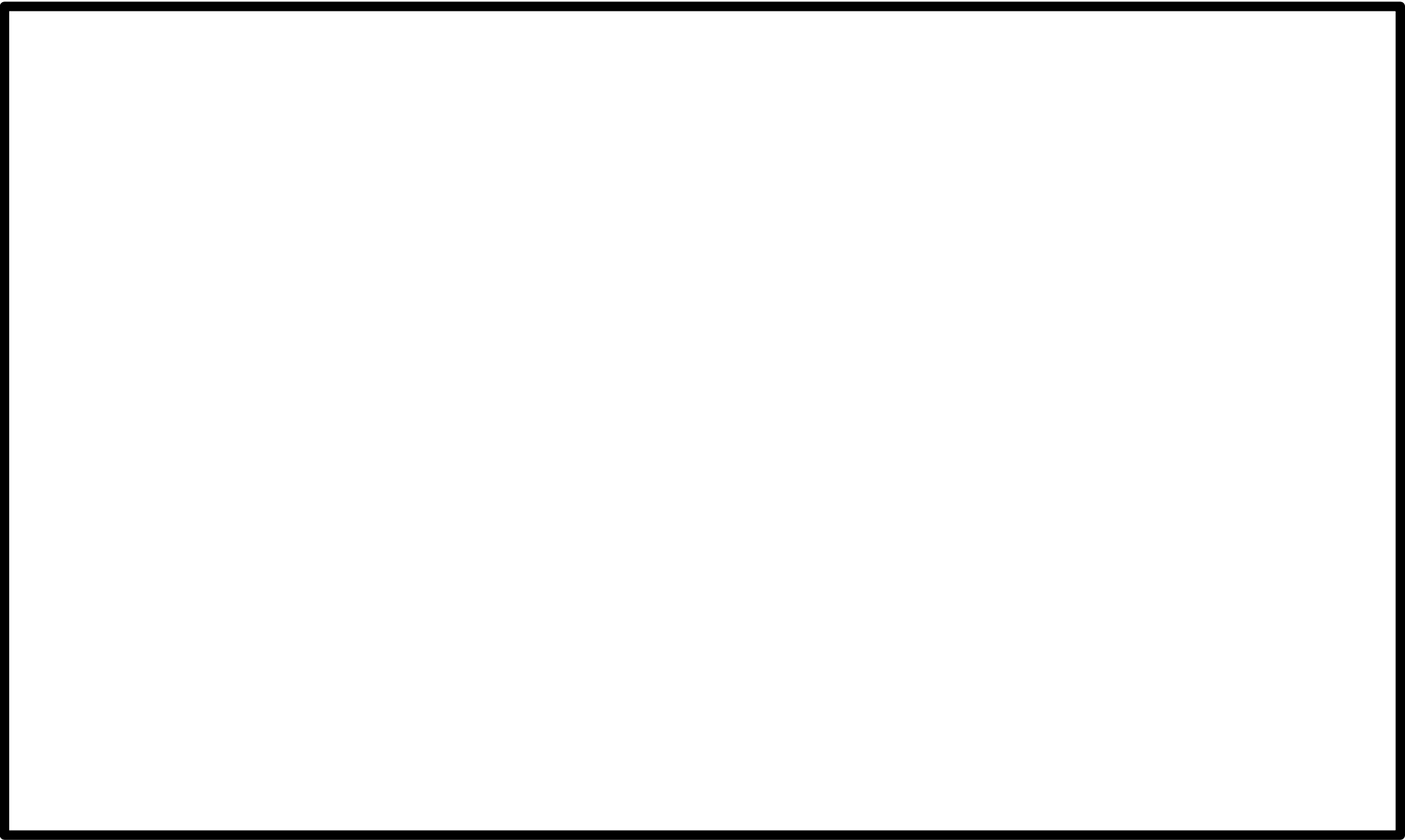
当該管 : T

比較管 : H







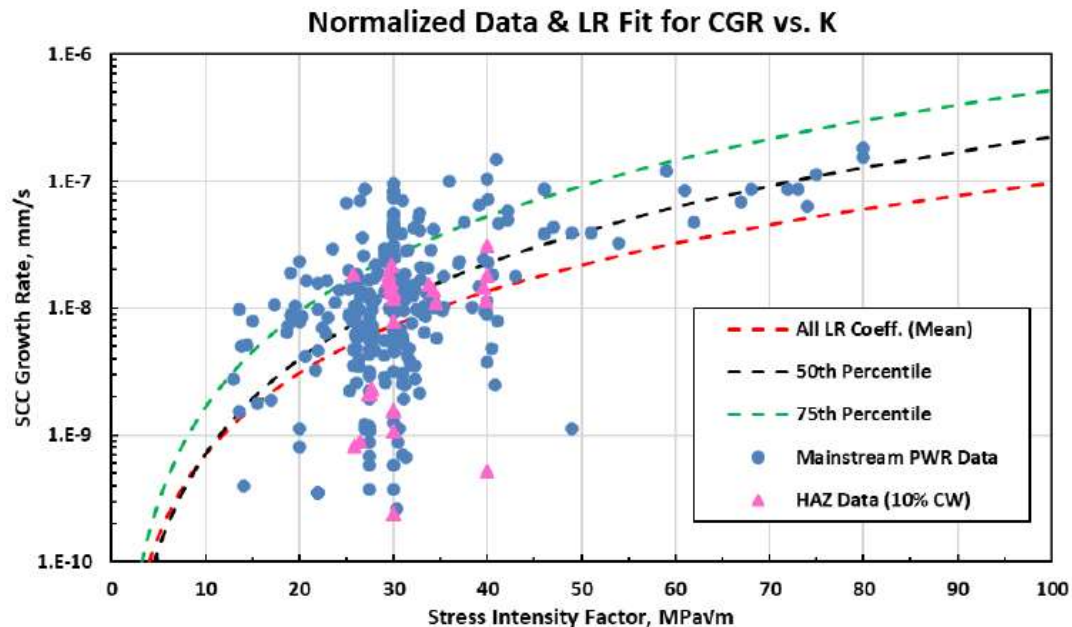




EPRI報告書にて提案されたSCC速度式（50%, 75%包絡線）

$$\text{CGR} = 1.50 \times 10^{-18} K^{2.5} H_v^{6.0} \exp(-85,000/RT) \quad (50\% \text{包絡線})$$

$$\text{CGR} = 3.19 \times 10^{-18} K^{2.5} H_v^{6.0} \exp(-85,000/RT) \quad (75\% \text{包絡線})$$



個別データは220 HVおよび290℃に換算した値としてプロットされている。

Figure 3-20
SCC growth rate data (mm/s) vs. K with the 50th percentile and 75th percentile curves. The individual data points are normalized to, and the curves are drawn for $H_v = 220$ and 290°C .

検討開始時には提案されていなかったEPRI式（MRP-458）が今年度公開され、国内PWR条件を含む多数のデータが含まれていることを確認。