
亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する 研究計画について

～PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの知見拡充の取組～

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

2022年 10月

本資料には、経済産業省「令和3年度原子力発電所の安全性向上に資する技術開発事業（原子力発電所の長期運転に向けた高経年化対策に関する研究開発）」の成果が含まれています。

目次

1. 背景・目的

2. 亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する2021年度検討概要

3. 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

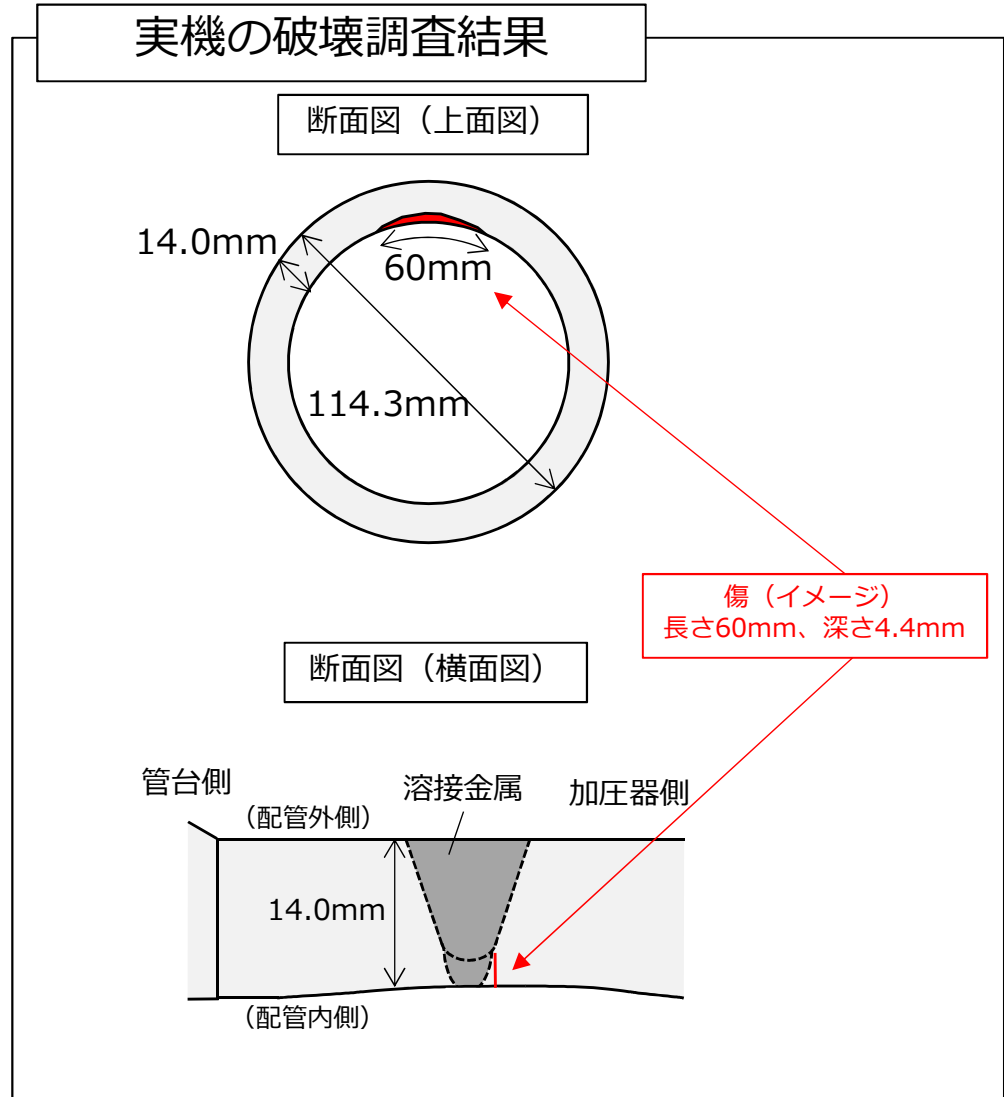
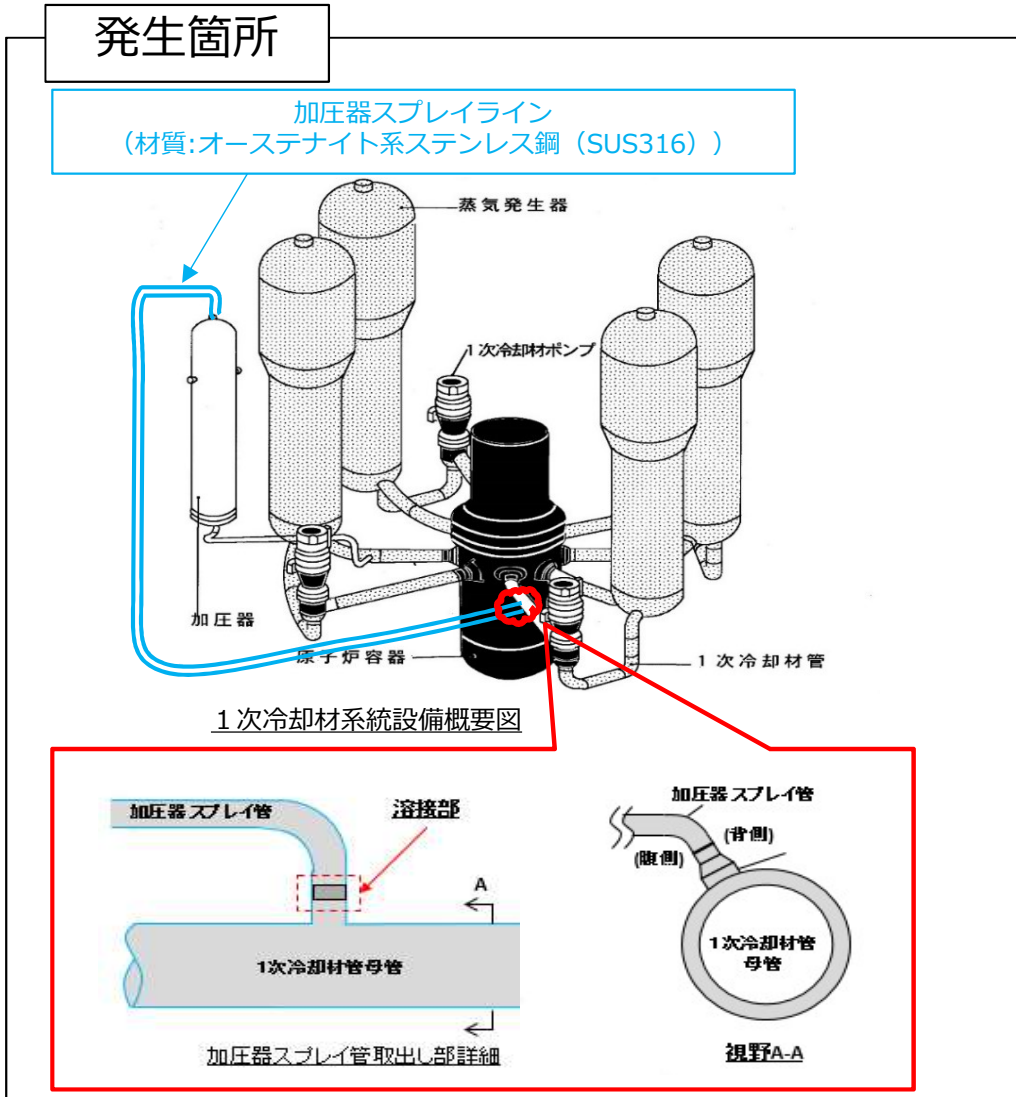
4. まとめ

参考資料

1. 背景・目的

1. 背景・目的 ～大飯3号機で発生した粒界割れ事象概要～

本検討の発端となった大飯発電所3号機加圧器スプレイ配管溶接部での粒界割れ事象の概要を以下に示す。



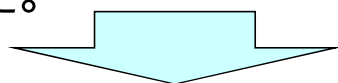
➤ 供用期間中検査 (ISI) にて、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と管継手 (エルボ部) の配管溶接部に有意な指示が認められた。その後の破壊調査により、**溶接熱影響部にて長さ60mm、深さ4.4mmの亀裂**があることが明らかとなった。

1. 背景・目的 ～亀裂発生メカニズム及び亀裂有り健全性評価に関する研究背景・目的～

<亀裂発生及び亀裂進展の状況整理>

(公開会合における関西電力説明)

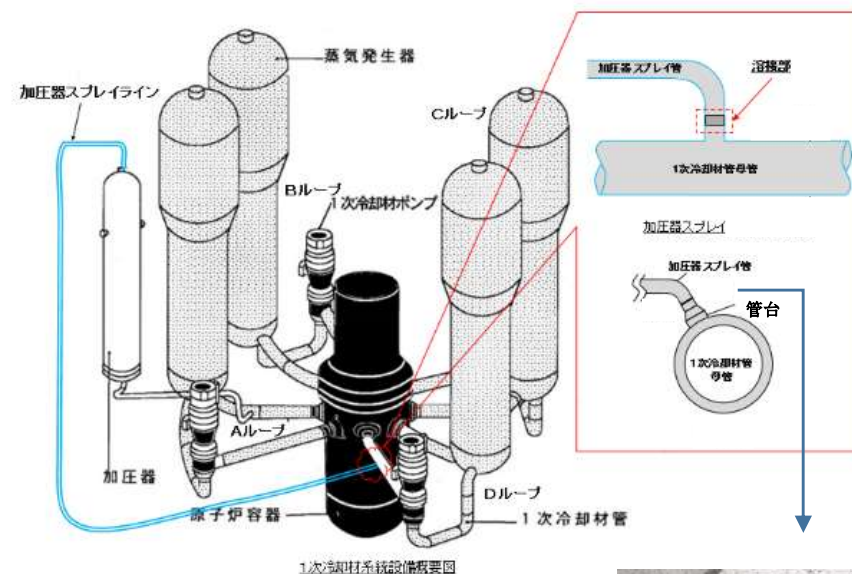
- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響したことにより割れが発生と推定。(現時点で、初期欠陥が認められていないが、溶接により微細な割れが発生していた可能性を否定できていない)
- また、亀裂進展に対しては、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼の割れが進展する既存知見と合致しており、粒界型SCCと推定。



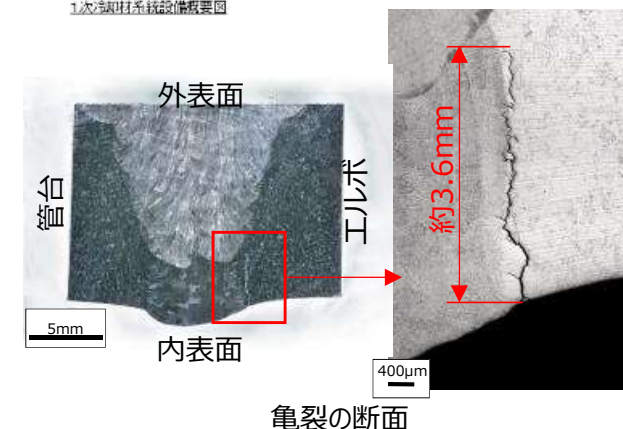
- ATENAとして、**PWR1次系ステンレス鋼配管における割れについては特異な事象であり、発生メカニズムなど知見がほとんどなく、原因の特定および知見拡充の観点から、研究・調査が必要であると認識。**

<研究目的>

本件事象に関する原因の特定および知見の拡充を進め、本件事象の再発防止対策検討の一助とするとともに、安全性を損ねることなく保全の最適化を実現し、原子力発電所の安全性・信頼性の向上に資する。



1次冷却材系統設備概要図



亀裂の断面

2. 亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する 2021年度検討概要

2. 亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する2021年度検討概要 ～検討プロセス～

2021年度に実施した、亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する課題検討プロセスを以下に示す。

<亀裂発生メカニズム>

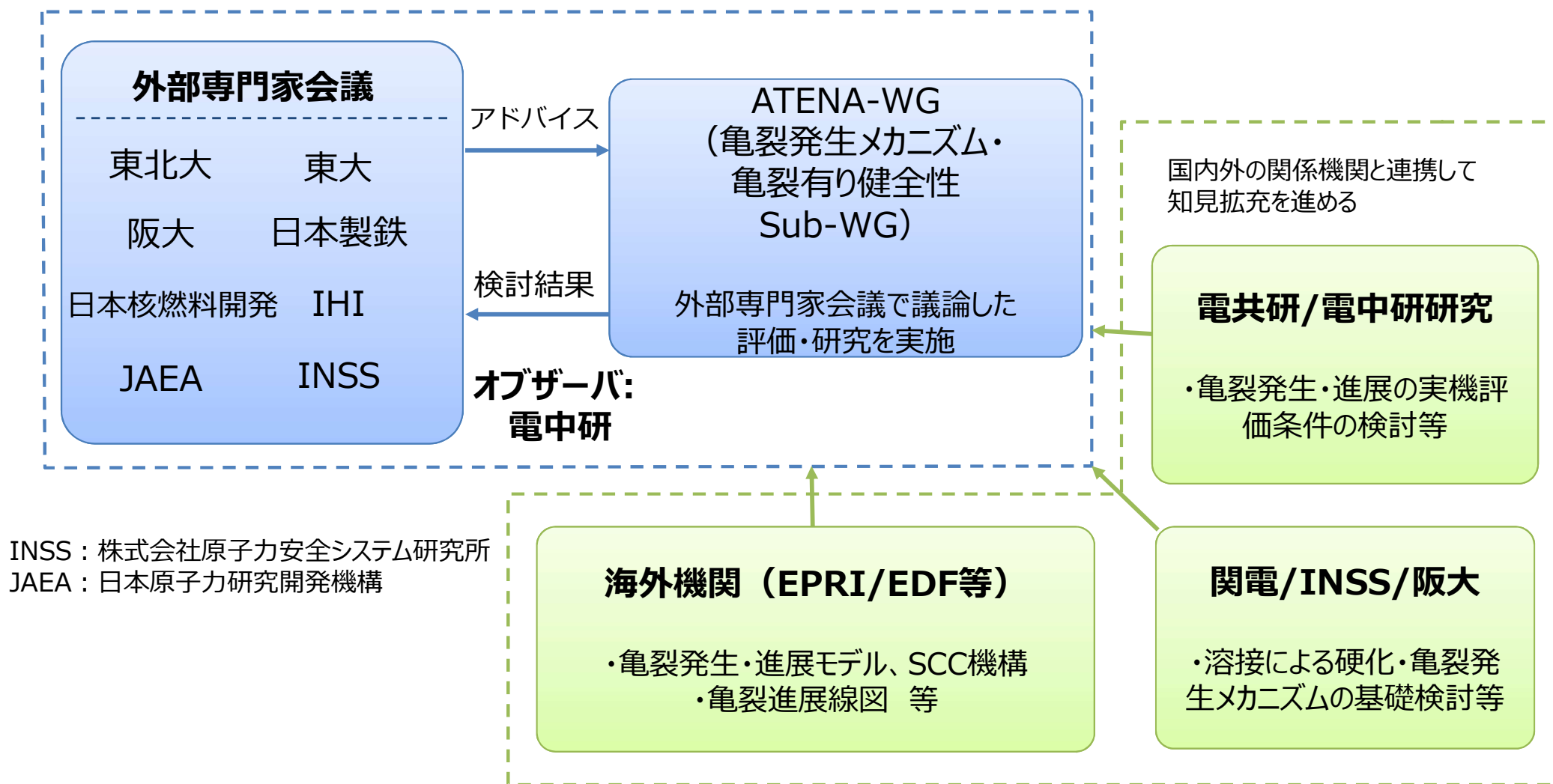
- i) 規制委員会との公開会合で議論されたFT図を含め、事象概要を外部専門家に説明し、考えられる要因をゼロベースで洗い出し
- ii) 事業者の調査結果等、既知見を踏まえて、原因となり得る要因の絞込みを実施
- iii) 絞込んだ結果を踏まえて、対応方針を検討 ⇒ 10
- iv) 対応方針に基づき、具体的な実施項目を検討し、研究計画として取りまとめた ⇒ 11 ~ 15

8

<亀裂有り健全性評価>

技術課題の整理（亀裂進展速度線図が規格化されていない等）および、技術課題を踏まえた実施項目を検討し、研究計画として取りまとめた

2. 亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する2021年度検討概要 ～検討体制～



INSS : 株式会社原子力安全システム研究所
 JAEA : 日本原子力研究開発機構

国内外の関係機関と連携しつつ、4年程度を目途に課題の達成を目指す
 (2022年度よりエネ庁受託研究とタイアップして実施)

2. 亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する2021年度検討概要 ～亀裂発生要因～

亀裂発生メカニズムに関し要因分析を行い、外部専門家のご意見を聞きながら、考えられる全ての項目を抽出。その中から、追加で研究すべき課題（因子）を抽出した。

事業者調査時の推定因子			事業者調査時の結果と今回得られた専門家意見	
事象	要因	因子	事業者調査結果と今回得られた専門家意見	判定※
加圧器 スプレイン 配管溶接部 の傷	機械的疲労	振動による疲労	・マクロ・ミクロ観察により、破面からビーチマークやストライエーションは確認されなかった。	×
		熱疲労	高サイクル熱疲労	・マクロ・ミクロ観察により、破面からビーチマークやストライエーションは確認されなかった。 ・単一の亀裂であり、熱疲労のような亀甲状の亀裂は確認されなかった。
	熱過渡による疲労		×	
	SCC	粒界型SCC	・破面ミクロ観察の結果、粒界割れが主に認められた。 ・硬さ計測の結果、表層で350HV、内部で200HV～240HVが認められた。 <外部専門家意見> 有力な因子と考えらえるが、粒界型SCCによる亀裂発生メカニズム・原因と断定する（他の因子を排除する）には、事業者調査では実施していないEBSD等も用いて当該部の特異性を追加調査すべき。	○
		粒内型SCC	・破面ミクロ観察の結果、粒内割れは殆ど認められなかった。 ・付着物EDS分析の結果、塩素等の有害な元素は認められなかった。	×
	溶接欠陥/ 溶接不良	溶接欠陥	・破面観察の結果、ブローホール、スラグ巻き込み、融合不良、高温割れ等は認められなかった。 ・PT及び断面観察の結果、アンダーカットは認められなかった。 ・付着物EDS分析の結果、高温割れの原因となるP(リン)は認められなかった。 ・その他、溶接手順は通常手順で実施されていた。 ・破面観察の結果、補修溶接の痕跡は認められなかった。 ・裏波部の外観、周方向断面観察の結果、明瞭な溶接欠陥は確認されず、補修溶接の痕跡も認められなかった <外部専門家意見> 明確な溶接欠陥／溶接不良が存在した可能性は低いものの、微細な欠陥／特異な溶接箇所が存在した可能性を完全に否定はできず、破面SEMでの拡大観察や、EDS分析での元素同定他により確認すべき。	△
溶接不良		△		

3. 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

3. 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 ～実施項目への展開～

8で抽出された「追加で研究すべき課題」および外部専門家会議において議論した「亀裂の進展予測評価に関する知見拡充項目」を実施項目に展開した。

	得られた課題	対応方針	実施項目
亀裂発生メカニズム	[粒界型SCC] 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響した可能性	特異な硬化、応力により割れが発生するメカニズムについて深掘りが必要	○実機詳細調査（損傷部位、比較部位） ・局所ひずみ測定（SEM/EBSD） ・断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得） ・溶接欠陥の調査(SEM/EDS) ・潜在き裂の調査(SEM/EDS) ・被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析(TEM)
	[溶接欠陥/不良] 溶接により微細な割れが発生していた可能性	高倍率の観察など詳細調査が必要	○発生特性に関する調査
亀裂有り健全性	進展予測評価式について、規格化されていない（検証が不十分）	進展予測評価に関する知見の拡充が必要	○SCC進展特性知見の調査 ○SCC進展特性データの取得 ○SCC進展速度線図案の策定 ○溶接残留応力評価 ○構造健全性評価 ○LBB評価の知見拡充

これらに加え、継続的に行う活動である「最新知見の調査」と「技術基盤の整備」を含めて、実施工程に展開した。 ⇒ 11

3. 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					■	

※上記活動は7頁記載の体制で実施。なお、2022年度については実施内容詳細を参考頁に記載。

3. 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、その結果に応じて適宜計画を見直していくこととした。

<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～) (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、亀裂先端ミクロ組織分析 (TEM)

3. 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～）

3. 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～）

3. 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～)

4. まとめ

4. まとめ

- ATENAは、PWR1次系ステンレス鋼配管における粒界割れは特異な事象であり、産業界を挙げて取り組むべき技術的共通課題であるとの認識に基づき、亀裂発生メカニズムおよび亀裂有り健全性評価に関する知見拡充のための研究計画を2021年度にまとめた。
- 2022年度以降、本研究計画に基づき研究を実施し、知見の拡充を進め必要な対策を講じることにより、本件事象の再発防止対策検討の一助とするとともに、安全性を損ねることなく保全の最適化を実現し、原子力発電所の安全性・信頼性の向上に資する。
また、海外での最新動向も含め、本研究を進める中で確認された新たな知見について引き続き専門家と意見交換し、適宜、研究内容に反映していく。

參考資料

亀裂発生・亀裂有り健全性に関する2022年度研究項目[1/2]

1. 最新知見の調査

- フランスのPWRプラントで認められた安全注入系配管溶接部のSCCなどの最新情報を収集し、本検討の計画に反映する必要があるか否かについて調査する。

2. 実機詳細調査

(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、亀裂先端ミクロ組織分析 (TEM)

➡ 次ページに示す。

4. (1) SCC進展特性知見の調査

- PWR1次系冷却水環境中のステンレス鋼のSCC進展特性およびSCC進展速度データに関する知見を収集、整理する。
- 既存知見が実機条件を網羅できているか確認し、知見拡充が必要な項目を整理する。

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性に関する2022年度研究項目[2/2]

実機詳細調査内容について

実施項目		実施内容	対象部位
(1)	①局所ひずみ測定 (SEM/EBSD)	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°の亀裂周辺のHAZ部（結晶粒の粗大化）及び表層側のシンニング部する断面マイクロ試験片を用いたSEM付属のEBSDによるIPF結晶粒分布、KAMマップ等を活用した結晶構造及び局所歪分布の確認。 標準偏差大、粗大粒の重畳により当該部の粒界応力が增大する可能性を調べるために、上記のEBSDでのKAM値等との相関検討として、同断面でのマイクロビッカース硬さ計での追加測定。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°の亀裂部周辺の断面（管台側/エルボ側） 当該管のクレータ部、90°、180°、270°の断面 比較管も同様位置（0°(クレータ部)、90°、180°、270°）の断面
	②断面マクロ硬さ測定		
(2)	①溶接欠陥の調査 (SEM/EDS)	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°亀裂周辺のHAZ部やその他領域（周方向）での溶接欠陥有無の確認のために、破面SEMでの拡大観察（すべり帯）。EDS分析での溶接欠陥の識別（Mn, Si, Mg, P, S等の溶接欠陥に起因する元素の同定）。 当該管0°以外の複数（5断面程度）での断面マイクロ観察での存在亀裂の形態（IG/TG, 長さ, 幅）や方向性の確認。 比較管でも同様な断面マイクロ観察での潜在亀裂有無の確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°近傍の破面全体（表面側に着目） 当該管0°の亀裂周辺の断面（5断面程度：管台側/エルボ側） 比較管も同様な位置の断面（5断面程度：エルボ側/直管側）
	②潜在き裂の調査 (SEM/EDS)		

※対象部位については、調査の進捗により見直す可能性がある。

略語	和名	名称
CGR	亀裂進展速度	Crack Growth Rate
EBSD	電子線後方散乱回折	Electron Back Scattered Diffraction
EDS	エネルギー分散型X線分光法	Energy dispersive X-ray spectroscopy
FEM	有限要素法	Finite Element Method
HAZ	熱影響部	Heat-Affected Zone
IG/TG	粒界／粒内	Intergranular／Transgranular
KAM	カーネル平均方位差	Kernel Average Misorientation
LBB	破断前漏洩	Leak-Before-Break
SCC	応力腐食割れ	Stress Corrosion Cracking
SEM	走査型電子顕微鏡	Scanning Electron Microscope
TEM	透過型電子顕微鏡	Transmission Electron Microscopy
MRP	材料信頼性プログラム	Materials Reliability Program
EPRI	米国電力研究所	The Electric Power Research Institute
EDF	フランス電力	Électricité de France