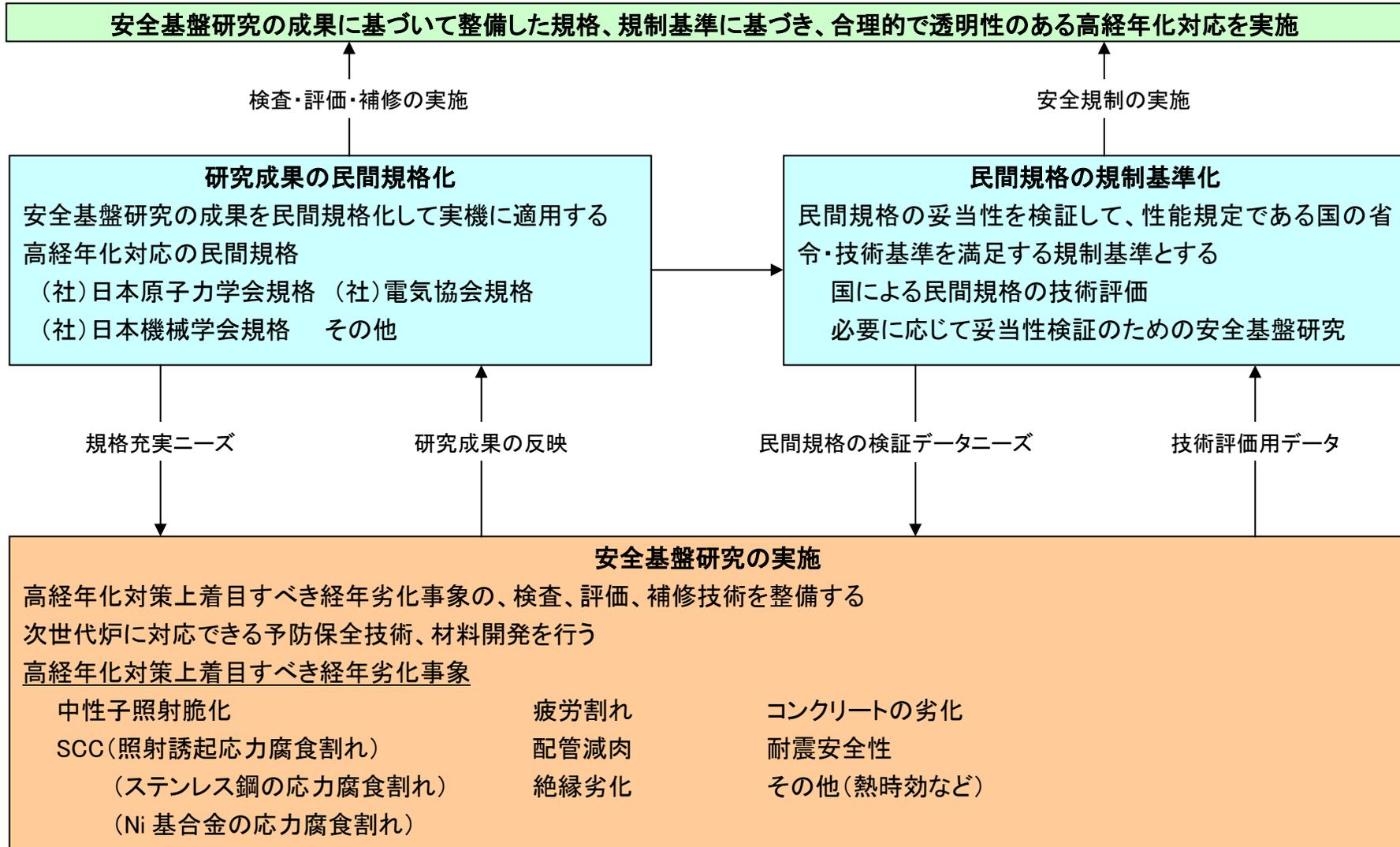


5. 安全基盤研究の推進に係る導入シナリオ



安全基盤研究の推進に係る技術マップ

		検査・モニタリング	評価	補修
照射脆化		<ul style="list-style-type: none"> ・60年供用時に継続するため監視試験片再生技術を規格化中 ・更に長期間適用可能な脆化監視技術開発を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・脆化予測・評価手法の適用照射量を60年供用用に増加するための研究中 ・新JMTRを活用し更なる適用照射量増加を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・小規模補修溶接技術の適用性を確証中 ・今後必要に応じ大規模補修法の調査を計画
SCC	照射誘起	—	<ul style="list-style-type: none"> ・発生・進展データを取得中 ・脆化予測法の整備、健全性評価法の高度化を実施中 ・新JMTRでの照射中IASCC挙動評価等を計画 	—
	ステンレス鋼	<ul style="list-style-type: none"> ・ISI用UT法の検査性を実証済、更に高精度化のためPAUT法の実証を計画 ・長期的には運転中モニタリング技術開発を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・発生・進展データの高精度化を実施中 ・長期的には寿命予測モデル(シミュレーション技術)化を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・補修技術の規格化推進 ・劣化緩和技術施工後の保全方策確立を計画
	Ni基合金	<ul style="list-style-type: none"> ・UT、ECTの実証試験を実施中 ・長期的にはUT/ECT等の複合検査、運転中モニタリング技術開発を計画 		
疲労		<ul style="list-style-type: none"> ・ISI用UT検査性を実証済み ・検査性の不十分な二相ステンレス鋼向け精度向上研究を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境疲労の研究を実施し、規格化済み ・環境疲労、大気中疲労曲線の見直しを計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・照射材補修溶接部の適用性を研究中
配管減肉		<ul style="list-style-type: none"> ・UT法を適用中、測定方法の高度化を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・機械学会規格を策定し適用中 ・減肉機構や余寿命予測法の高度化のため基礎研究を実施中 	—
絶縁劣化		<ul style="list-style-type: none"> ・予測評価できる手法は未確立 ・予測評価に資するモニタリング法の要素的研究を実施中、実機適用性評価の後開発を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・劣化評価に電気学会技術報告を適用中 ・劣化模擬性等を改良した劣化評価手法を開発中 	—
コンクリート劣化		<ul style="list-style-type: none"> ・非破壊的検査法の適用性検討中 ・IT技術を駆使した検査・モニタリング法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・当面の課題としてひび割れ・放射線の影響と、健全性2次評価法の整備を計画 ・50年供用を目途に、CCVの評価、複合劣化評価・機器取合局部評価・確率論評価等を、更に長期的には劣化機構論に基づく評価法を計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・50年供用を目途に、補修・補強法の適用性(耐久性)を計画
耐震安全性		—	<ul style="list-style-type: none"> ・減肉配管、き裂付き炉内構造物・配管等の耐震安全性評価技術の信頼性向上研究中 ・長期的には、耐震バックチェック結果等を考慮した評価技術の見直し研究、確率論的な耐震安全性評価技術の整備を計画 	—

安全基盤研究の推進に係るロードマップ

着手時期		第Ⅰ期（初期プラント40年まで）に着手	第Ⅱ期（初期プラント40年～50年）に着手	第Ⅲ期（初期プラント50年～60年）に着手	
照射脆化	検査監視	監視試験片再生技術の検証	長期間適用可能な脆化監視技術開発と検証		
	評価	適用範囲が60年供用相当の照射量の評価法	適用範囲>70年供用相当照射量の評価法（新JMTR活用）		
SCC	照射誘起	検査監視	UT、ECTの検証	UT/ECT等の複合検査、運転中モニタリング技術開発	UT/ECT等の複合検査、運転中モニタリング実用化
		評価	評価用基礎データ、予測評価法整備 IASCC評価高度化技術の検証	照射中計測による挙動解明（新JMTR）、評価法の高度化	耐IASCC材の開発
		補修	照射材補修溶接部の適用性		
	ステンレス鋼	検査監視	UT、ECTの検証	運転中モニタリング技術の開発	運転中モニタリング技術の実用化
		評価	発生・進展評価手法の高精度化 低炭素ステンレス鋼の低き裂進展速度領域線図の検証	寿命予測モデル（シミュレーション技術）化開発	寿命予測モデル（シミュレーション技術）化実用化
		補修	劣化緩和技術施工後の保全方策		
	Ni基合金	検査監視	UT、ECTの検証	UT/ECT等の複合検査、運転中モニタリング技術開発	UT/ECT等の複合検査、運転中モニタリング実用化
		評価	発生・進展・破壊評価手法の高精度化	寿命予測モデル（シミュレーション技術）化開発	寿命予測モデル（シミュレーション技術）実用化
		補修	劣化緩和技術施工後の保全方策		
疲労	検査監視	ステンレス鋼の高精度非破壊検査技術の検証	疲労モニタリング技術の高度化		
	評価	環境疲労評価技術の高度化	設計疲労曲線の見直し		
	補修	照射材補修溶接部の適用性			
配管減肉	検査監視	測定方法の高度化研究			
	評価	減肉機構や余寿命予測法の高度化研究			
絶縁劣化	検査監視	予測評価に資するモニタリング法の要素的研究	モニタリング手法の実用化開発		
	評価	ケーブルの健全性評価手法の整備 電気・計装設備の健全性評価技術調査研究	実機データ、機構解明による劣化評価手法の検証見直し		
コンクリート劣化	検査監視	非破壊的検査法の適用性	検査法高度化・モニタリング法の開発		
	評価	ひび割れが生じた場合の中性化と鉄筋腐食評価 放射線の影響検討 健全性二次評価法の検討	複合劣化評価・機器取合局部評価・2次評価法の整備等	劣化機構論に基づく評価法	
	補修		補修・補強法の適用性（耐久性）		
耐震安全性	評価	減肉配管、き裂付き炉内構造物・配管等の耐震安全性評価技術の信頼性向上	耐震バックチェック結果等を考慮した評価技術の見直し研究、確率論的な耐震安全性評価技術の整備		

赤字は平成20年度開始予定研究

青字は第Ⅰ期開始候補研究

原子炉圧力容器の照射脆化に係る導入シナリオ

原子炉圧力容器の照射脆化とは

- ・燃料領域から漏れてくる高速中性子により原子炉圧力容器壁が照射されると、容器壁の微細な組織変化が生じて脆化する。
- ・照射量が多いほど照射脆化は進むため、供用期間が長期化するほど照射脆化が進む。
- ・照射脆化の原因となる容器壁の微細な組織変化の程度は、容器壁鋼材に含まれる銅などの不純物量や化学成分によって異なる。

現状分析

脆化の監視

- ・実機の照射脆化の程度は、圧力容器内で照射した監視試験片を用いて監視している。監視試験片数量には限りがあるので、長期供用時に脆化監視を継続するため、監視試験片の再生利用や、加速照射データを実用化するための研究が必要である。

健全性の評価

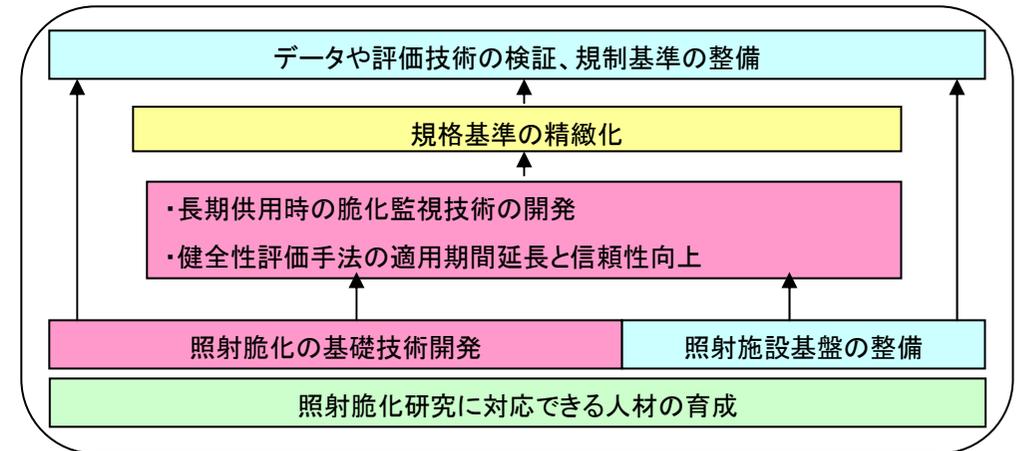
- ・圧力容器の長期の供用可能性を評価するため、長期供用時の照射脆化を予測し健全性を評価する手法が規格化されている。実績データに基づく経験的な手法なので、民間研究により、蓄積した監視試験データを反映し、脆化機構の研究成果を反映して改良している。
- ・長期供用時の評価の信頼性維持向上のためには、民間の評価手法を長期供用相当の高照射量加速照射試験データで検証することが重要であり、加速照射データの実用化研究が必要である。また、供用可能性をより現実的に評価するための確率論評価手法の整備も必要である。

研究基盤

- ・上記研究を実施するためには、JMTR等の施設基盤や、加速照射・計測・モデリングなどの基盤技術が必要である。

高経年化対応研究方針

長期供用時の脆化監の視継続、健全性予測評価の適用期間延長と信頼性向上のための研究を実施する。これらに研究資する加速照射技術の基礎研究と施設基盤整備を行う。研究成果を規格に反映して実用化し、また技術評価して規制に活用する。



産官学の役割分担

① 産業界の役割

- 安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究及び基盤整備

- ・長期供用時の脆化監視技術の開発
- ・健全性評価手法の適用期間延長と信頼性向上
- ・照射脆化の基礎技術開発（共同研究の実施主体）

② 国・官界の役割

- 安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- 必要な基盤（知識・人材・施設・制度）の整備
- 産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

- ・データや評価技術の検証、規制基準の整備
- ・照射施設基盤の整備

③ 学術界の役割

- 知の蓄積と展開（安全基盤研究の検証）
- 研究を支える人材の育成

- ・照射脆化研究に対応出来る人材の育成（規格基準の精緻化支援）

④ 学協会の役割

- 規格基準化とその高度化に貢献

- ・規格基準の精緻化

産学官の連携

産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

- ・加速照射技術の基礎技術開発
- 科学的基礎に基づいて加速照射データを実機評価に適用するための基盤研究

原子炉圧力容器の照射脆化に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
健全性評価手法の適用期間延長と信頼性向上	脆化予測式の高精度化	脆化機構に基づく脆化予測式の開発	産/産
	脆化予測式の長期適用	長期照射データ等に基づく脆化予測式の長期信頼性向上	
	破壊靱性評価法の高精度化	遷移域破壊靱性評価法の適正化と適用期間延長	
	破壊靱性評価法の長期適用	全温度域破壊靱性評価法の高精度化と適用期間延長	
	確率論評価手法の開発	長期供用性評価に資する確率論的評価手法の開発	
データや評価技術の検証、規制基準化(健全性評価手法)	脆化予測式の検証	高照射量等のデータによる脆化予測式の検証	官/官
	破壊靱性評価法の検証	高照射量等のデータによる破壊靱性評価法の検証	
	補修溶接部の検証	再照射補修溶接部脆化挙動のデータによる検証	
	確率論評価手法の検証	長期供用性評価に資する確率論的評価手法の検証	
長期供用時の脆化監視技術の開発		材料消耗の少ない、又は加速照射による脆化監視技術の開発	産/産
データや評価技術の検証、規制基準化(脆化監視)	HAZ 監視省略の検証	溶接熱影響部等の監視試験の省略に関する検証	官/官
	脆化監視技術の検証	材料消耗の少ない、又は加速照射による脆化監視技術の検証	
照射脆化の基礎技術開発		高速照射技術による高照射量材の脆化研究、照射による微細組織変化の計測技術、脆化機構のモデル化に関する研究	産学官/ 産官
照射施設基盤の整備		JMTR を活用した基礎研究	官/官
人材育成		照射脆化研究に対応できる人材の育成	学/学

原子炉圧力容器の照射脆化に係るロードマップ

項目	技術課題	第Ⅰ期(H21年度まで)					第Ⅱ期(h22年度～H31年度)						第Ⅲ期
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015-2019	2020-2029
健全性評価手法の適用期間延長と信頼性向上	脆化予測式の高精度化	脆化機構に基づく脆化予測式の開発											
	脆化予測式の長期適用						長期照射データ等に基づく脆化予測式の長期信頼性向上						
	破壊靱性評価法の高精度化	遷移温度域破壊靱性評価法の適正化と適用期間延長											
	破壊靱性評価法の長期適用						全温度域破壊靱性評価法の適正化と適用期間延長						
	確率論評価手法の開発						長期供用性評価に資する確率論的評価手法の開発						
データや評価技術の検証、規制基準の整備(健全性評価手法)	脆化予測式の検証	高照射量等のデータによる脆化予測式の検証(～60年)					高照射量等のデータによる脆化予測式の検証(>60年)						
	破壊靱性評価法の検証	高照射量等のデータによる破壊靱性評価法の検証(～60年)					高照射量等のデータによる破壊靱性評価法の検証(>60年)						
	補修溶接部の検証	再照射補修溶接部脆化挙動のデータによる検証											
	確率論評価手法の検証						長期供用性評価に資する確率論的評価手法の開発						
長期供用時の脆化監視技術の開発							材料消耗の少ない、又は加速照射による脆化監視技術の開発						
データや評価技術の検証、規制基準の整備(脆化監視)	HAZ監視省略の検証	溶接熱影響部等の監視試験の省略に関する検証											
	脆化監視技術の検証						材料消耗の少ない、又は加速照射による脆化監視技術の検証						
照射脆化の基礎技術開発							高速照射技術による高照射量材の脆化研究、照射による微細組織変化の計測技術、脆化機構のモデル化に関する研究						
照射施設基盤の整備							JMTRを活用した基礎研究						
規格基準の精緻化		△JEAC改訂→技術評価					△JEAC改訂→技術評価						

SCC 欠陥の検査に係る導入シナリオ

SCC 欠陥の検査とは

—原子炉炉内や配管において、欠陥の有無、もし欠陥が発見された場合はその位置や大きさを非破壊で検査することである。現在用いられる SCC き裂の非破壊検査技術は、VT、UT、ECT 等が主流である。

—炉内機器で見られる SCC は、炉水に接した面から発生し、一般的に粒界型で、進展する途中で分岐したり、複数の欠陥が同一箇所が発生したりする特徴がある。SCC の発生する部位は、母材、溶接金属、溶接熱影響部等で形状も多様であり、また、水中や放射線場などで遠隔による高度な検査が技術が必要である。

現状分析

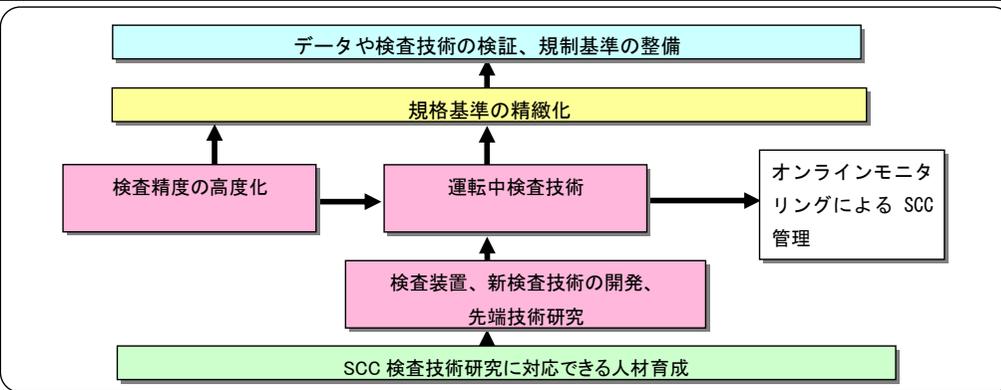
BWR のシュラウドや PLR 配管における SCC の発生や、PWR あるいは BWR のニッケル基合金溶接部における SCC の発生に関し、これらの部位に対する非破壊検査試験の精度確認として JNES プロジェクトによる実証試験が行われている。前者は「低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証 (NSA)」として平成 15 年から平成 18 年まで実施され、その成果が JNES より SS レポートとして発行された。現在、この成果を規格化すべく、社団法人 日本電気協会にて規程・指針 (JEAC・JEAG) の拡充作業を行っている。また、後者については、BWR/PWR におけるニッケル基合金溶接金属部としてシュラウドサポートやセーフエンド、圧力容器貫通部の SCC を対象とした「ニッケル基合金溶接部の非破壊検査技術実証 (NNW) (平成 14 年～平成 20 年)、PWR の圧力容器貫通部狭隙部における PWSCC を対象を限定した「容器貫通部狭隙部の非破壊検査技術実証 (NPV) (平成 17 年～平成 20 年) のプロジェクトが進捗中である。いずれも UT と ECT の実証試験であり、プロジェクト完了時に速やかに規程・指針化される計画である。

一方、プラントの供用期間中検査 (ISI) として、社団法人日本機械学会の発電用原子力設備規格 維持規格が本格的に導入されつつあり、産業界ではこの規格に準じた検査を可能とする検査技術あるいは炉内遠隔検査装置の確立が急がれている。特に、新たに規定される炉内構造物等の個別検査のうち、BWR では検査対象機器が増え、検査範囲も増加していることから、目視試験の高度化や炉内狭隙部、炉内薄肉配管等の検査装置が必要となっている。

原子力プラントの高経年化による機器損傷事例の増加や、それに伴う機器健全性評価の精度を確保するために、非破壊検査によるき裂検出精度、サイジング精度向上の要求、期待が高まっている。その一方で、検査対象箇所の急激な増加や、技術的に難度の高い検査の要求などにより、プラントの定期事業者検査に従事できる非破壊検査員の不足が生じているとの声もある。今後は、リスクベースに基づく検査の適切な合理化や、プラント運転中でも可能な検査技術の開発が期待されている。

高経年化対応研究方針

原子力プラントの高経年化に備え、現在実施されている JNES プロジェクトの成果を速やかに規格基準に反映させる必要がある。UT や ECT 等の非破壊検査方法の複合化による検査の高効率化や高精度化が期待できることから、第Ⅱ期で複合検査技術の開発とその技術実証を行う。さらに、検査の合理的な実施を目的に、第Ⅱ期からはプラント運転中検査技術の開発を開始し、第Ⅲ期のオンライン検査技術の確立を目指す。



産官学の役割分担

①産業界の役割

- 安全性、信頼性、経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備
- ・検査精度の高度化
- ・検査装置、新検査技術の開発
- ・検査に係る先端技術研究 (共同研究の主体者)
- ・運転中検査技術

②国・官界の役割

- 安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- 必要な基盤 (知識、人材、施設、制度) の整備
- 産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援
- ・データや検査技術の検証、規制基準の整備
- ・学協会規格のエンドース、健全性評価ガイド策定

③学界の役割

- 知の蓄積と展開 (安全基盤研究の検証)
- 研究を支える人材の育成
- ・SCC 検査技術研究に対応できる人材育成 (共同研究の主体者)
- ・ (規格基準の精緻化支援)

④学協会の役割

- 規格基準化とその高度化に貢献
- ・規格基準の精緻化

産学官の連携

産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

・検査に係る先端技術研究

先端的な検査技術の開発は、学の研究ポテンシャルを踏まえて産学官で共同して効率化する。

・SCC 検査技術研究に対応できる人材育成

産官学の人的交流を図り、SCC 研究や検査に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

SCC 欠陥の検査に係る技術マップ (1/2)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
検査精度の高度化	PAUT 法の欠陥検出性	・ フェーズドアレイ UT 法の欠陥検出性、サイジング	産/産
	炉外からの UT 検査性	・ 欠陥性検出性	産/産
	補修溶接部 UT、ECT 検査性	・ 欠陥性検出性	産/産
	水中 PT 技術	・ 欠陥性検出性	産、学/産
	複合検査技術	・ 2つまたはそれ以上の検査技術を複合して適用することによる検査精度の向上	産、学/産
運転中検査技術	運転中検査技術、診断技術	・ 運転中に継続監視が行える検査手法の精度実証	産、学/産
検査装置、新検査技術の開発	炉内狭隘部、炉内薄肉配管検査技術、装置開発	・ 装置、検査技術の開発	産/産
	VT 高感度化技術開発	・ 装置、検査技術の開発	産/産
	水中 PT 技術	・ 装置、検査技術の開発	産、学/産
	複合検査技術開発	・ 装置、検査技術の開発、先端技術適用	産、学/産
	実機残留応力計測技術開発	・ 装置、技術の開発、先端技術適用	産、学/産
	運転中検査技術開発	・ 原子炉容器、配管に対応した装置、検査技術の開発、先端技術適用	産、学/産

SCC 欠陥の検査に係る技術マップ (2/2)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
データや検査技術の検証、規制基準の整備	低炭素ステンレス鋼検査技術実証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化 	官／官
	Ni基合金溶接部、圧力容器貫通部狭隙部検査技術実証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化 	官／官
	原子力発電所の非破壊検査情報収集	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非破壊検査情報を収集して、規制に反映 ・ 補修溶接部検査情報 ・ 炉外からの UT 検査情報 	官／官
	欠陥等継続検査の運転中監視技術実証	<ul style="list-style-type: none"> ・ SCC 等の継続検査として運転中監視技術の実証と指針策定 	官／官
SCC 検査技術研究に対応できる人材育成	SCC 検査技術研究に対応できる人材育成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人材育成 	学／学

SCC 欠陥の検査に係るロードマップ

年度	第 I 期(初期原子カプラントの 40 年まで)					第 II 期(同 50 年まで)						第 III 期(同 60 年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
検査精度の高度化				PAUT 法の欠陥 検出性				水中 PT/代替技術				
					炉外からの UT 検査性					複合検査技術		
					補修溶接部 UT、ECT 検査性							
運転中検査技術											運転中検査技術、診断技術	
検査装置、新技術開発				炉内狭隘部、炉内薄肉配管検査技 術、装置開発								
				VT 高感度化技 術開発				水中 PT/代替技術開発				
								複合検査技術開発				
										実機残留応力計測技術開発		
											運転中検査技術開発	
データや検査技術の検証、規制 基準の整備	低炭素ステンレ ス鋼検査技術 実証										欠陥等継続検査の運転中監視技術実証	
	Ni 基合金溶接部、圧力容器貫通部 狭隘部検査技術実証											
					非破壊検査情報の収集整備							
規格基準、規制基準への反映					UT、ECT 技術の JEAC、JEAG への反映					補修溶接部検査技術の JEAC、JEAG への反映		運転中検査要求の維持規格へ の反映
					SCC 健全性評価ガイド					複合検査技術の規格化		
										SCC 長期健全性評価ガイド		

運転中モニタリングに係るロードマップ

運転中モニタリングとは

—SCC は材料、環境、応力の3つの要因が重畳して発生する。運転中モニタリングは、運転中にそれぞれの要因を継続的に監視し、SCCの研究から得られる SCC き裂発生・進展シミュレーション技術と連携して、SCC 発生時期の予測、進展量の予測を実施し、炉内での SCC の状況を把握して高経年炉の安全運転に寄与する技術である。

現状分析

検査のあり方検討会において、高経年化対策充実のために、状態監視保全や運転中を含めた新しい監視・評価技術の導入が有効であるとされている。しかしながら、現在のところ、SCC 事象に関する状態監視保全技術の開発・適用方針はなく、健全性評価等に基づいた時間計画保全(TBM)を中心とした方法をとっており、SCC に関連した点検頻度は過度の保守性に基づいている可能性がある。

現状実施されている SCC に関連したモニタリング技術として、炉内水質については、炉水サンプリングポイントでの調査、RPVボトムドレン水の水質分析結果を基に、照射場を考慮した炉内水質をラジオリシスモデルにより解析しているが、炉内環境を精度良く評価するには至っていないと思われる。また、炉内構造材の腐食環境に関しては、腐食電位(ECP)測定が行われ、シミュレーションによる炉内構造材各所の腐食電位評価が行われているが、測定用センサー設置場所の制約等により必ずしも評価精度は十分とはいえない。

一方、実機構成材の SCC の発生や進展挙動等に関するモニタリング手法は確立されておらず、炉外における実機炉水を用いた SCC 試験や炉水を模擬した環境下でのラボ試験が実施されている。

運転中ヘルスマニタリング技術を開発、実機適用することにより、腐食電位、SCC 発生進展挙動等を実測することが可能となる。これにより、環境緩和の効果と有効範囲(部位)の明確化、実機 SCC データの拡充がはかられ、規格基準の高度化に資することが可能となる。また、応力改善策等の設備保全策の長期有効性確認、材料経年劣化モニターによるトラブル未然防止に伴う稼働率上昇や適切な長期的設備保全の策定および点検頻度の最適化とそれに伴う被ばく低減が見込まれる。

高経年化対応研究方針

長期にわたる SCC 事象の予測精度向上や状態監視保全手法を構築し、SCC 事象を的確に把握して、高経年化に対応した点検・検査の適正化を図るため、炉内構造材や配管の SCC に関する健全性モニタリング技術の開発、実証を行う



産官学の役割分担

①産業界の役割

—安全性、信頼性、
経済性の確保向上を
目的とした開発研究
および基盤整備

- ・運転中モニタリング技術開発
- ・モニタリング基盤技術(共同研究の主体者)
センサー開発等

②国・官界の役割

—安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
—必要な基盤(知識、人材、施設、制度)の整備
—産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

- ・データや評価技術の検証、規制基準の整備
- 学協会規格のエンドース、健全性評価ガイド策定

③学術界の役割

—知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
—研究を支える人材の育成

- ・SCC のモニタリング技術研究に対応できる人材育成(共同研究の主体者)
- (規格基準の精緻化支援)

④学協会の役割

—規格基準化とその高度化に貢献

- ・規格基準の精緻化

産学官の連携

産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

・モニタリング基盤技術

SCC に関わるモニタリング技術は、新規の技術開課題であり、早期に実機適用を図るためには、産学官で協力して効率的に推進する必要がある。

・SCC のモニタリング技術研究に対応できる人材育成

産官学の人的交流を図り、SCC 研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

運転中モニタリング技術に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
モニタリング基盤技術	モニタリング基盤技術の高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内水質や SCC 挙動を把握するためのセンサー技術等モニタリング基盤技術、先端技術に関する研究 	産、学、官／ 産、学、官
運転中モニタリング技術	実機腐食環境評価手法の高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内水質を把握するための腐食環境評価手法の開発、高度化 	産、学／産
	SCC き裂発生、進展モニタリング技術の開発、実証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 腐食環境(腐食電位)や SCC 発生進展挙動を把握するためのモニタリング技術の開発と実証 	産、学／産
	炉内ヘルスマニタリング技術の開発、実証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内水質(腐食電位)/SCC 発生、進展挙動 ・ 材料経年劣化モニター ・ 予防保全対策や応力改善策の長期有効性評価への適用性を実証 ・ 状態監視保全技術 	産、学／産
評価技術の検証、規制基準の整備	運転中モニタリング技術の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安全規制高度化のためにモニタリング技術の検証 	官／官
SCC のモニタリング技術研究に対応できる人材育成	SCC のモニタリング技術研究に対応できる人材育成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人材育成 	学／学

運転中モニタリングに係るロードマップ

年 度	第 I 期(初期原子カプラントの 40 年まで)					第 II 期(同 50 年まで)						第 III 期(同 60 年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
モニタリング基盤技術						モニタリング基盤技術の高度化						長期健全性維持と運転中モニタリングの実機適用
運転中モニタリング技術						実機腐食環境評価手法の高度化						
						SCC き裂発生、進展モニタリング技術の開発、実証						
						炉内ヘルスマニタリング技術の開発、実証						
評価技術の検証・規制基準の整備						運転中モニタリング技術の検証						
規格基準、規制基準への反映	維持規格へ反映 SCC 健全性評価ガイド					維持規格への反映 SCC 発生・進展シミュレーションの規格化 SCC 長期健全性評価ガイド						

ステンレス鋼の応力腐食割れ (IGSCC) の健全性評価に係る導入シナリオ

ステンレス鋼の IGSCC (非鋭敏化型 SCC) とは

—鋭敏化応力腐食割れの対策材として実機に適用されている低炭素ステンレス鋼製の再循環配管及び炉心シュラウドにおいて、近年、表面硬化層を起点とした非鋭敏化型 SCC が認められている。
 —再循環系配管の SCC は溶接残留応力に従って溶接金属に向かって進展しており、発見されたき裂は、配管口径、運転年数によらず概ね深さ 10mm 以下である。
 —炉心シュラウドの SCC は、リング部では溶融線から数 mm 離れた位置に断続的に全周に渡ったき裂や胴部にも部分的なき裂が確認されている。
 —原因は明確でないが、表面加工層があると発生しやすいことが知られている。

現状分析

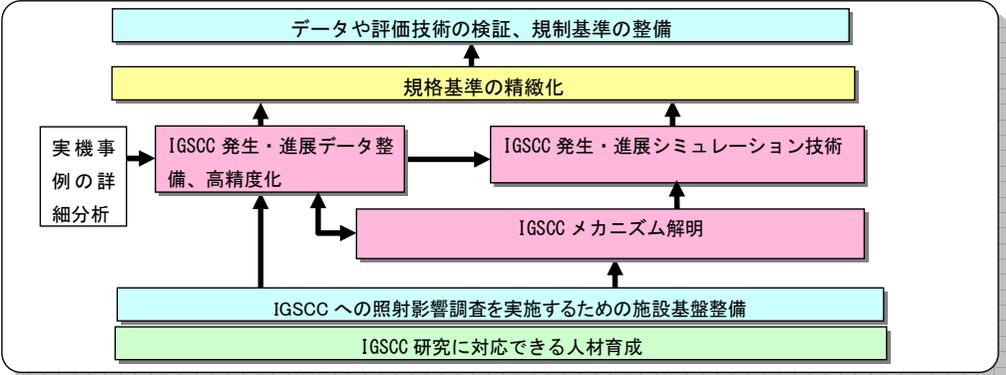
現状、き裂進展を評価して機器としての健全性を評価する維持基準が適用されており、保守性をもった維持・管理がなされている。また、種々の条件下の SCC 進展速度データ拡充がはかれている。しかしながら、再循環系配管においては実機調査結果と維持基準に則った健全性評価とに差異が認められており、更なる健全性評価の高度化、具体的には確率論的評価を伴う SCC 発生挙動や溶接金属部における停留挙動の評価手法の確立が喫緊の課題となっており、長期的に実機データを規格基準にフィードバックする取り組みが必要となっている。

一方、維持規格の導入により水素注入 (HWC) など、これまで単に予防保全の 1 つであった環境緩和策は、その適用や効果の有無がき裂進展評価や点検頻度の設定にも関連する位置づけとなった。BWR の維持規格には HWC 環境下でのき裂進展線図があるものの、HWC の効果の判断クライテリアが規準化されていないこと等から HWC 線図の健全性評価への適用が進んでいない。環境改善対策の効果を検討した評価手法を早期に構築する必要がある。

メカニズムに関する研究も活発であるが、今のところ不明な点が多く、十分には解明されていない。SCC き裂進展は、溶接部の硬化部位で加速され、溶接金属中でもき裂が伝播すること等が知られている。また、シュラウド等の炉内構造物では中性子照射を受けることが予想され、それに伴うき裂進展加速を考慮する必要があることが指摘されている。

高経年化対応研究方針

SCC 発生挙動や溶接境界部でのき裂進展および環境緩和技術等を考慮して、高経年化プラントの SCC 発生・進展評価、健全性評価の高精度化を行い、実機における SCC 事象を的確に把握して制御するとともに、点検頻度の適正化を図る。SCC き裂発生、進展機構解明研究や高経年化時複合事象の検討の成果をふまえ、SCC 健全性評価に関する維持規格の改訂、充実を継続的に行う。



産官学の役割分担

①産業界の役割

- 安全性、信頼性、経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備
- ・IGSCC 発生・進展データ整備、高精度化
- ・IGSCC 発生・進展シミュレーション技術
- 炉内構造物の IGSCC 発生・進展を予測する方法の開発と実機適用
- ・IGSCC メカニズム解明 (共同研究の主体者)

②国・官界の役割

- 安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- 必要な基盤 (知識、人材、施設、制度) の整備
- 産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援
- ・データや評価技術の検証、規制基準の整備
- 学協会規格のエンドース、健全性評価ガイド策定
- ・IGSCC への照射の影響を研究するための施設基盤整備 (共同研究の主体者)

③学術界の役割

- 知の蓄積と展開 (安全基盤研究の検証)
- 研究を支える人材の育成
- ・IGSCC 研究に対応できる人材育成 (共同研究の主体者)
- (・規格基準の精緻化支援)

④学協会の役割

- 規格基準化とその高度化に貢献
- ・規格基準の精緻化

産学官の連携

- 産学官による協調・共同研究が必要な研究課題
- ・IGSCC メカニズム解明
メカニズム解明は科学的合理性の基礎となり産官ともに必要で、学の研究ポテンシャルを踏まえて産学官で共同して効率化する。
- ・IGSCC への照射の影響を研究するための施設基盤整備
炉内構造物の IGSCC 研究には照射を伴う研究が必要なことから、JMTR 等の照射施設基盤整備を産官で協力して推進する。
- ・IGSCC 研究に対応できる人材育成
産学官の人的交流を図り、IGSCC 研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

ステンレス鋼の応力腐食割れ (IGSCC) の健全性評価に係る技術マップ (1/2)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
IGSCC 発生・進展データ 整備、高精度化	IGSCC き裂発生・進展データの拡張、高精度化	<ul style="list-style-type: none"> IGSCC 加速要因を抽出して、重要要因毎にき裂発生・進展評価、必要に応じて維持規格の修正を提案 IGSCC 発生試験方法妥当性検討 	産/産
	溶融線近傍の SCC 停留挙動評価	<ul style="list-style-type: none"> 溶接境界での SCC 停留挙動を解明 検査期間の設定へ反映 	産/産
	ラボデータと実機データ、実機事象相関	<ul style="list-style-type: none"> 国内外の実機事例の詳細分析 実験室試験結果の整合性検討 	産/産
	実機廃却材、実機炉水環境下でのき裂発生・進展データ取得	<ul style="list-style-type: none"> IGSCC データベース充実 IGSCC き裂進展速度線図の高精度化 	産/産
	HWC 線図の健全性評価への適用	<ul style="list-style-type: none"> 環境改善対策の効果を考慮した評価手法を構築 HWC 等効果のクライテリア基準、必要に応じて維持規格の修正を提案 	産/産
	ステンレス配管の溶接残留応力解析手法	<ul style="list-style-type: none"> 溶接残留応力の解析手法および K の評価手法の高度化、維持規格への提案 	産/産

ステンレス鋼の応力腐食割れ (IGSCC) の健全性評価に係る技術マップ (2/2)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
データや評価技術の検証、規制基準の整備	IGSCC 評価技術検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化 ・ IGSCC の加速要因として 低中性子照射、 低 K 値域でのき裂進展挙動、 溶接金属のき裂進展挙動、 溶接硬化、 起動停止の影響、 水の放射線分解 等が課題 ・ JMTR 等の研究基盤整備 ・ ステンレス配管の溶接残留応力解析手法の検証 	官/官
IGSCC メカニズム解明	IGSCC 発生・進展メカニズム解明とモデル構築	<ul style="list-style-type: none"> ・ IGSCC 加速要因の抽出 (低照射量、照射速度、起動停止、K 変化率、表面加工、水の放射線分解等) ・ 発生・進展モデル構築による進展予測法 	産、学、官 / 産、学、官
IGSCC 発生・進展シミュレーション技術	IGSCC 発生・進展シミュレーション技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 技術開発と実機への適用 	産/産
IGSCC 研究に対応できる人材育成	IGSCC 研究に対応できる人材育成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人材育成 	学/学

ステンレス鋼の応力腐食割れ (IGSCC) の健全性評価に係るロードマップ

年度	第 I 期(初期原子カプラントの 40 年まで)					第 II 期(同 50 年まで)						第 III 期(同 60 年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
IGSCC 発生・進展データ整備、高精度化	IGSCC 発生試験方法妥当性検討											
	IGSCC き裂発生データの 拡張、高精度化											
	IGSCC き裂進展データ拡張・高精度化											
	溶融線近傍の SCC 停留挙動評価											
	ラボデータと実機事象相関											
	実機廃却材、実機炉水環境下発生・進展データ取得											
	HWC 健全性適用検討											
	ステンレス鋼配管の残留応力解析手法											
データや評価技術の検証、規制基準の整備	IGSCC 評価技術検証 (溶接硬化)		IGSCC 評価技術検証 (低 K 値域、溶接金属)									
	IGSCC 評価技術検証 (低照射量、低照射速度の影響、水の放射線分解、照射中効果の検証)											
	ステンレス鋼配管の残留応力解析手法の検証											
IGSCC メカニズム解明	IGSCC き裂発生、進展メカニズム解明、モデル構築										高経年化時複合事象検討	
	IGSCC 発生・進展シミュレーション技術											
規格基準、規制基準への反映	維持規格へ反映					維持規格への反映、長期健全性評価の維持規格						
	IGSCC 健全性評価ガイド					シミュレーション、モニタリングの規格化						
						SCC 長期健全性評価ガイド						

照射誘起応力腐食割れ (IASCC) の健全性評価に係る導入シナリオ

照射誘起応力腐食割れ (IASCC) とは

- 中性子照射量がしきい値を超えて増大するとステンレス鋼の IASCC 感受性が増大し、炉内構造物の IASCC 割れが発生しやすくなる。
- 鋭敏化しない低炭素ステンレス鋼でも発生する。
- IASCC は SCC の 3 要素 材料、環境、応力にさらに中性子照射の影響が重畳した複合事象と考えられている (図 1)。
- BWR 環境と PWR 環境両方で発生する可能性がある。

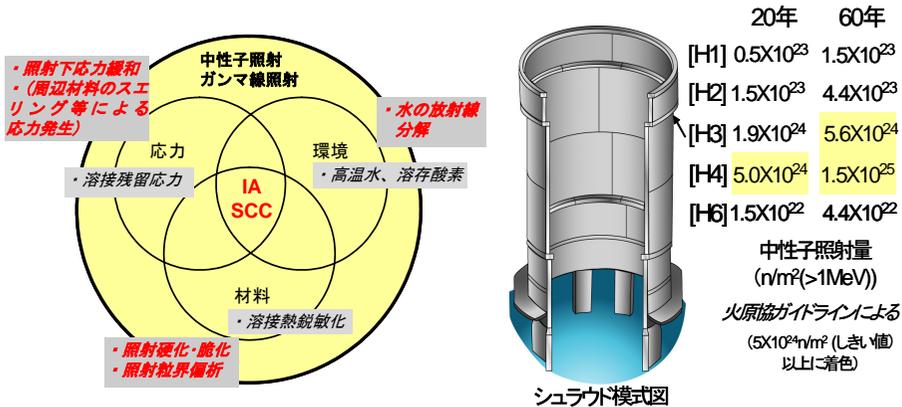


図 1 IASCC は材料、応力、環境と照射が重畳したときに発生する

図 2 BWR シュラウドにおける 20 年と 60 年運転後の各溶接線での中性子照射量 (計算値)

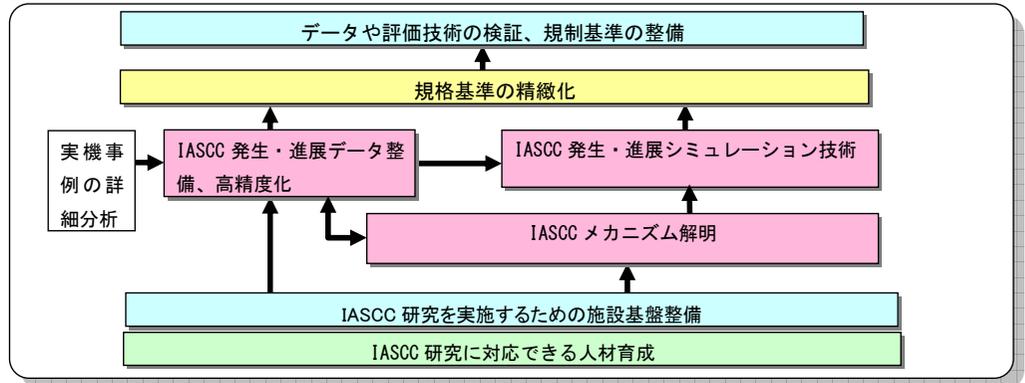
現状分析

原子炉の高経年化に伴い、炉内構造物の中性子照射量が増大し (図 2)、IASCC の発生する可能性がより高くなると考えられる。現在までに、BWR では、高照射を受けた制御棒で発生が報告されている。また、PWR においては、国内で IASCC 事例は報告されていないが、海外では高照射で高応力が負荷されるパッフルフォーマボルトに多数の事例が確認されている。以上の状況から世界的にも IASCC 現象が注目され始めており、研究が活発化している。現在、国の事業として IASCC き裂進展データを検証して規制基準の整備が実施中である。また、国際協力によるメカニズム研究も行われており、JAEA 等の研究機関が参画している。

しかし、今のところ IASCC の発生・進展に関するデータは乏しく、メカニズムに関しても確定されていない。今後、高経年化原子炉の安全性、信頼性を確保するためには、IASCC 発生・進展に関するデータ充実と高精度化が不可欠である。また、IASCC メカニズムに関する理解を深めて、IASCC 発生・進展の予測が行える IASCC シミュレーション技術の開発が急務である。それらの研究を推進するために、JMTR 等の施設基盤の整備が重要で、また、IASCC の研究に携わっている人的資源も十分でないことから、IASCC 研究を推進する幅広い知識を持った人材育成にも注力する必要がある。

高経年化対応研究方針

炉の高経年化に伴う中性子照射量増加に対応する IASCC 発生・進展データ整備、高精度化を実施し、同時に IASCC メカニズム解明を推進して、IASCC 発生・進展を予測するシミュレーション技術の開発、実機適用を進める。それらの成果を反映して規格基準の精緻化、また、科学的合理性を持った規制基準の整備等に繋げる。そのために必要な IASCC 研究を実施するための施設基盤整備と IASCC 研究に対応できる人材育成も行う。



産官学の役割分担

①産業界の役割

- 安全性、信頼性、経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備

- ・IASCC 発生・進展データ整備、高精度化
- ・IASCC 発生・進展シミュレーション技術
- 炉内構造物の IASCC 発生・進展を予測する方法の開発と実機適用
- ・IASCC メカニズム解明 (共同研究の主体者)

②国・官界の役割

- 安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- 必要な基盤 (知識、人材、施設、制度) の整備
- 産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

- ・データや評価技術の検証、規制基準の整備
- 学協会規格のエンドース、健全性評価ガイド策定
- ・IASCC 研究を実施するための施設基盤整備 (共同研究の主体者)

③学術界の役割

- 知の蓄積と展開 (安全基盤研究の検証)
- 研究を支える人材の育成

- ・IASCC 研究に対応できる人材育成 (共同研究の主体者)
- (規格基準の精緻化支援)

④学協会の役割

- 規格基準化とその高度化に貢献

- ・規格基準の精緻化

産官学の連携

- 産官学による協調・共同研究が必要な研究課題

・IASCC メカニズム解明
メカニズム解明は科学的合理性の基礎となり産官ともに必要で、学の研究ポテンシャルを踏まえて産官で共同して効率化する。

・IASCC 研究を実施するための施設基盤整備

IASCC 研究には照射を伴う研究が必要なことから、JMTR 等の照射施設基盤整備を産官で協力して推進する。

・IASCC 研究に対応できる人材育成

産官学の人的交流を図り、IASCC 研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

照射誘起応力腐食割れ（IASCC）の健全性評価に係る技術マップ（1/2）

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
IASCC発生・進展データ整備、高精度化	IASCC き裂発生・進展データの拡張、高精度化	<ul style="list-style-type: none"> ・ IASCC 加速要因を抽出して、重要要因毎にき裂発生・進展評価、必要に応じて維持規格の修正を提案 ・ 高照射下での IASCC 挙動データ取得 ・ IASCC 発生試験方法妥当性評価 	産/産
	ラボデータと実機事象相関	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国内外の実機事例の詳細分析 ・ 実験室試験結果の整合性検討 	産/産
	実機廃却材を用いたき裂進展データ取得	<ul style="list-style-type: none"> ・ IASCC データベース充実 ・ IASCC き裂進展速度線図の高精度化 ・ 中性子照射による破壊靱性低下データ 	産/産
データや評価技術の検証、規制基準の整備	IASCC 評価技術検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化 	官/官
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 国際協力等による実機廃却材を用いたデータ検証 	産、官/産、官
IASCC メカニズム解明	IASCC 発生・進展メカニズム解明とモデル構築	<ul style="list-style-type: none"> ・ IASCC 加速要因の抽出（照射速度、起動停止、K 変化率、水の放射線分解等） ・ 発生・進展モデル構築による進展予測法 ・ 高照射下での IASCC メカニズム検討 ・ 加速照射の妥当性検討 	産、学、官/産、学、官

照射誘起応力腐食割れ（IASCC）の健全性評価に係る技術マップ（2/2）

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
IASCC 発生・進展シミュレーション技術	IASCC 発生・進展シミュレーション技術開発	・ 技術開発と実機への適用	産/産
・IASCC 研究を実施するための施設基盤整備 ・IASCC 発生・進展データ整備、高精度化	照射中 IASCC 発生・進展評価	・ JMTR 等の施設基盤整備	官/官
		・ 照射中現象を正確に取入れた健全性評価技術の高度化	産、官/産、官
IASCC 研究に対応できる人材育成	IASCC 研究に対応できる人材育成	・ 人材育成	学/学

照射誘起応力腐食割れ（IASCC）の健全性評価に係るロードマップ

年 度	第 I 期（初期原子カプラントの 40 年まで）					第 II 期（同 50 年まで）						第 III 期（同 60 年まで）
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015～2019	2020～2029
IASCC 発生・進展データ整備、高精度化	IASCC 発生試験方法											
	IASCC き裂発生データの					拡張、高精度化						
						IASCC き裂進展データ拡張・高精度化						
						ラボデータと実機事象相関						
						実機廃却材を用いたき裂進展データ取得						
IASCC 研究を実施するための施設基盤整備 IASCC 発生・進展データ整備、高精度化						照射中 IASCC 発生・進展評価						
						JMTR 等研究施設の改修						
データや評価技術の検証、規制基準の整備	IASCC 評価技術検証		IASCC 評価技術検証（規制規格の高度化）									
IASCC メカニズム解明	加速照射の妥当性検討											高照射下での IASCC メカニズム検討
						IASCC き裂発生、進展メカニズム解明、モデル構築						
IASCC 発生・進展シミュレーション技術						IASCC 発生、進展シミュレーション技術開発						
規格基準、規制基準への反映	維持規格へ反映					維持規格への反映						
	IASCC 健全性評価ガイド					IASCC 発生・進展シミュレーションの規格化						
						SCC 長期健全性評価ガイド						

Ni 合金の応力腐食割れの健全性評価に係る導入シナリオ

Ni 合金の IGSCC (NiSCC/PWSCC) とは

—Ni 合金は圧力バウンダリー構成機器や炉内構造物など重要な部位に使用されている。母材、溶接金属ともに、BWR 環境中でも PWR 一次冷却水環境中でも粒界型の割れを生じる。

—BWR 環境中では、粒界での鋭敏化が原因とされており、水素注入環境やニオブ添加による鋭敏化抑制が有効とされている。

—PWR 一次冷却水環境中での SCC (PWSCC という) は、BWR の場合と異なる原因と考えられ、発生メカニズムとして「活性経路腐食 (APC) 説」、「水素説」、「内部酸化説」が提案されている。対策材として 690 系合金が有力である。

現状分析

BWR 環境中

近年、国外プラントにおいて再循環ノズル溶接部等に応力腐食割れ (SCC) の発生が認められ、また、我が国においても、シュラウドサポートや CRD ハウジングにおいて SCC の発生が報告されている。Ni 合金の SCC への対応は、原子炉圧力容器への進展性の検討を含め、今後の高経年化対応において最も重要な課題の一つである。Ni 合金の SCC 特性については、応力、水質などの環境や溶接部の組織など材料特性が影響することが明らかになってきている。しかし、最近、実機溶接部の SCC 損傷事例の検討結果から、応力拡大係数 (K 値) が増加するときと減少するときのき裂進展速度が異なることや、長時間経過すると進展速度が遅くなるなど K 値変化率の影響や溶接金属のデンドライト方向依存性などに関して新しい知見が得られており、更なるき裂進展評価の高精度化が必要とされている。SCC 発生に関しては、試験データが限られている表面加工、起動停止 (応力面、環境面) 等の影響についてデータを拡充すること、SCC 発生寿命評価手法を確立し健全性評価への反映することが望まれている。また、健全性評価手法の妥当性を確認するために、実機損傷データを拡充しデータベース化をはかるとともに実機データや実機材・実環境下試験結果とラボ試験結果から予測される評価結果との総合的評価を行い、著しい乖離が生じている場合には健全性評価手法の見直しはかかる取り組みが重要と考えられる。

PWR 環境中 (PWSCC)

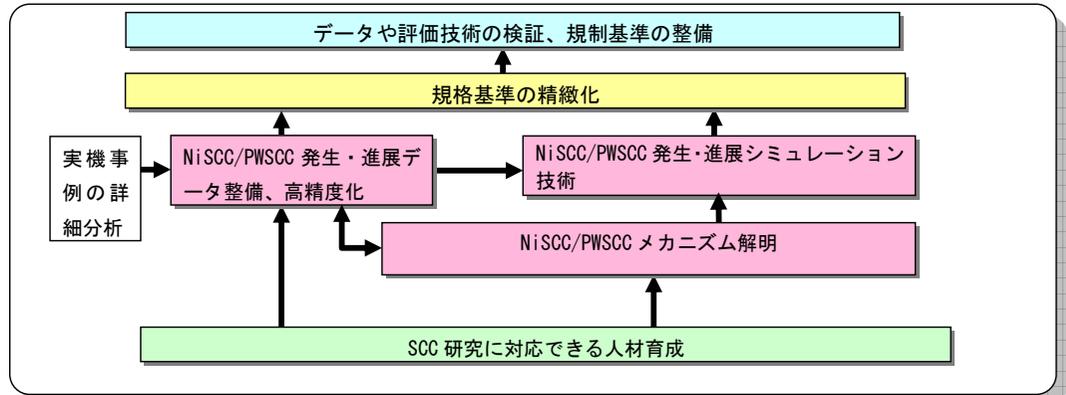
国内外の PWR プラントにおいては、これまでに蒸気発生器伝熱管、原子炉容器上蓋管台、加圧器管台等の Ni 合金使用部位で一次冷却材による応力腐食割れ事象が多数発生している。

PWSCC は、材料、環境、応力という要素の重畳により発生する。材料、環境については、600 系 Ni 合金が高温純水 (PWR の一次冷却材環境) 中で感受性を有し、また、使用温度が高い方が発生時間は短くなることが知られている。環境温度の発生時間への影響はアレニウスの式により評価可能である。

また、応力については、民間の研究 (電共研) により、発生に係るしきい値のデータを取得済であるが、690 系合金については温度が高い部位に対し、プラント 60 年運転を想定したデータが十分に取得できていない。

高経年化対応研究方針

高経年化プラントの Ni 合金の溶接金属、母材の SCC 発生・進展データの拡張、充実による健全性評価の高精度化を行う。実機における SCC 事象を的確に把握して制御するとともに、点検頻度の適正化を図る。PWSCC 対策材 690 系合金については、継続して長期健全性データを取得し、高経年化にあたっての信頼性を確認する。さらに、発生・進展シミュレーション技術を用いて、運転中の健全性確認技術の高度化を図る。



産官学の役割分担

①産業界の役割

—安全性、信頼性、経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備

・NiSCC/PWSCC 発生・進展データ整備、高精度化
 ・NiSCC/PWSCC 発生・進展シミュレーション技術
 炉内構造物の Ni 合金 SCC の発生・進展を予測する方法の開発と実機適用
 ・Ni 合金 SCC メカニズム解明 (共同研究の主体者)

②国・官界の役割

—安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
 —必要な基盤 (知識、人材、施設、制度) の整備
 —産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

・データや評価技術の検証、規制基準の整備
 学協会規格のエンドース、健全性評価ガイド策定

③学術界の役割

—知の蓄積と展開 (安全基盤研究の検証)
 —研究を支える人材の育成

・SCC 研究に対応できる人材育成 (共同研究の主体者)
 (・規格基準の精緻化支援)

④学協会の役割

—規格基準化とその高度化に貢献

・規格基準の精緻化

産学官の連携

産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

・Ni 合金 SCC メカニズム解明

メカニズム解明は科学的合理性の基礎となり産官ともに必要で、学術界の研究ポテンシャルを踏まえて産学官で共同して効率化する。

・SCC 研究に対応できる人材育成

産官学の人的交流を図り、SCC 研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

Ni 基合金の応力腐食割れ (NiSCC) の健全性評価に係る技術マップ (BWR)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
NiSCC 発生・進展データ整備、高精度化	NiSCC き裂発生・進展データの拡張、高精度化	<ul style="list-style-type: none"> NiSCC 加速要因を抽出して、重要要因毎にき裂発生・進展評価、必要に応じて維持規格の修正を提案 NiSCC 発生試験方法妥当性検討 破壊靱性データ 	産/産
	異材継手溶接線近傍の SCC 挙動評価	<ul style="list-style-type: none"> 低合金鋼と Ni 基合金溶接境界(異材継手)での SCC 挙動 	産、学/産
	SCC 対策・補修の有効性実証	<ul style="list-style-type: none"> 改良材、応力改善、環境改善等の SCC 対策や補修の有効性を検証 	産/産
	Ni 基合金溶接金属、母材(熱影響部)での発生寿命評価	<ul style="list-style-type: none"> Ni 基合金の SCC 発生裕度評価および発生しきい応力を把握し、SCC 発生寿命を評価 点検頻度や点検範囲の設定、規格への提案 	産、学/産
データや評価技術の検証、規制基準の整備	NiSCC 評価技術検証	<ul style="list-style-type: none"> 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化 	官/官
	Ni 基合金溶接部破壊評価基準の整備		
NiSCC メカニズム解明	NiSCC 発生・進展メカニズム解明とモデル構築	<ul style="list-style-type: none"> NiSCC 加速要因の抽出(起動停止、K 変化率、水の放射線分解等) 発生・進展モデル構築による進展予測法 	産、学、官/ 産、学、官
NiSCC 発生・進展シミュレーション技術	NiSCC 発生・進展シミュレーション技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 技術開発と実機への適用 	産/産
SCC 研究に対応できる人材育成	SCC 研究に対応できる人材育成	<ul style="list-style-type: none"> 人材育成 	学/学

Ni 基合金の応力腐食割れ (PWSCC) の健全性評価に係る技術マップ (PWR)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
PWSCC 進展データ整備、 高精度化	PWSCC き裂進展データの拡張、高精度化	・ PWSCC の進展データの低 K 値への拡張、評価、必要に応じて維持規格の修正を提案	産/産
	ラボデータと実機事象相関	・ 国内外の実機事例の詳細分析 ・ 実験室試験結果の整合性検討	産/産
	690系合金の長期信頼性	・ 継続して長期信頼性を確認	産/産
データや評価技術の検証、 規制基準の整備	PWSCC 評価技術検証	・ 学協会規格のデータ(破壊靱性データを含む)や評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化	官/官
PWSCC メカニズム解明	PWSCC 発生・進展メカニズム 解明とモデル構築	・ PWSCC 加速要因の抽出(起動停止、K 変化率、水の放射線分解、溶存水素量等) ・ 発生・進展モデル構築による進展予測法	産、学、官/ 産、学、官
		・ メカニズムに基づいた長期健全性対策材の開発等	産/産
PWSCC 発生・進展シミュレーション技術	PWSCC 発生・進展シミュレーション技術開発	・ 技術開発と実機への適用	産/産
SCC 研究に対応できる人材育成	SCC 研究に対応できる人材育成	・ 人材育成	学/学

Ni 合金の応力腐食割れ (NiSCC) の健全性評価に係るロードマップ (BWR)

年度	第 I 期 (初期原子力プラントの 40 年まで)					第 II 期 (同 50 年まで)						第 III 期 (同 60 年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
NiSCC 発生・進展データ整備、高精度化	NiSCC 発生試験方法妥当性検討											
	NiSCC き裂発生データの					拡張、高精度化						
						NiSCC き裂進展データ拡張・高精度化						
						異材継手溶接線近傍の SCC 挙動評価						
						Ni 合金溶接金属、母材 (熱影響部) での発生寿命評価						
データや評価技術の検証、規制基準の整備						SCC 対策・補修の有効性実証						
						NiSCC 評価技術検証 (規制基準の高度化)						
NiSCC メカニズム解明						Ni 合金溶接部破壊評価基準の整備						
						NiSCC き裂発生、進展メカニズム解明、モデル構築						
NiSCC 発生・進展シミュレーション技術						NiSCC 発生、進展シミュレーション技術開発						
規格基準、規制基準への反映	維持規格へ反映					維持規格への反映、長期健全性評価の維持規格						
	SCC 健全性評価ガイド					シミュレーション、モニタリングの規格化						
						SCC 長期健全性評価ガイド						

Ni 基合金の応力腐食割れ (PWSCC) の健全性評価に係るロードマップ (PWR)

年 度	第 I 期 (初期原子カプラントの 40 年まで)					第 II 期 (同 50 年まで)						第 III 期 (同 60 年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
PWSCC 進展データ整備、高精度化						PWSCC き裂進展データ拡張・高精度化						
						ラボデータと実機事象との相関						
						690系合金の長期信頼性						
データや評価技術の検証、規制基準の整備						PWSCC 評価技術検証 (規制基準の高度化)						
						Ni 基合金溶接部破壊評価基準の整備						
PWSCC メカニズム解明						PWSCC き裂発生、進展メカニズム解明、モデル構築						
						長期健全性対策材開発・適用						
PWSCC 発生・進展シミュレーション技術						PWSCC 発生、進展シミュレーション技術開発						
規格基準、規制基準への反映						維持規格への反映、長期健全性評価の維持規格						
	維持規格へ反映											
	SCC 健全性評価ガイド					シミュレーション、モニタリングの規格化						
					SCC 長期健全性評価ガイド							

SCC 保全技術（予防保全、補修、取替等）に係る導入シナリオ

SCC 保全技術（予防保全、補修・取替等）とは

- SCC に対する予防保全方法として、SCC 発生する前に応力緩和や環境緩和を実施する、また、SCC に対して抵抗性の高い材料に交換する等がある。
- 補修・取替は、SCC が顕在化した事後対策技術である。補修方法としては、補修溶接が一般的であるが、中性子照射を受けて補修溶接が不可能な場合は補強ジグを取り付ける方法が実施されている。

現状分析

【環境緩和】

(1)BWR：SCC の主要環境因子は冷却材の放射線分解によって生成する酸化種と系外から持ち込まれるイオン不純物(特にアニオン)である。後者については、影響の大きいとされる硫酸イオンを中心として、近年、管理の強化が図られており現状は問題のあるレベルにはないと考えられている。酸化剤抑制の取り組みについて、近年、a.主蒸気系線量率が上昇しない範囲の水素注入量でSCC環境緩和効果を高める、貴金属処理(NMCA、NMC、NMCI:一部プラントで実施中)、ヒドラジン注入(技術開発中)、b.水素を必要としない新たなSCC緩和策としてTiO₂注入(技術開発中)、c. ECPセンサーの開発・適用、d. 炉内SCC環境評価手法、d. 起動時水素注入(一部プラントで実施中)等の技術開発が進められている。

(2)PWR：一次系が液相単相・閉鎖系であるため、一次冷却材の放射線分解による酸化種の生成を抑制するため高濃度の水素注入が当初より行われてきた。この結果、BWRのような活性溶解型のSCCは、滞留した大気飽和水(停止中)によるものだけでなく、その他の可能性は低いと考えられる。一方、このような還元雰囲気的一次冷却材環境であっても、Ni基合金にSCC(PWSCC)が生じる。近年、このPWSCCの進展速度、発生(潜伏期間)に、一次冷却材中の溶存酸素濃度が影響を及ぼすとの知見が得られており、燃料被覆管の腐食・水素化挙動、腐食生成物の移行・放射化挙動への影響と合わせて大きな関心が寄せられている。すなわち、溶存水素濃度を最適化、亜鉛注入等である。

【環境緩和以外】

BWRにおいては、1998年に福島第一3号機でシュラウド取替、2000年に敦賀1号機のシュラウドサポート・シュラウド取替が行われ、その後いくつかのプラントでシュラウド取替が行われている。また、PLR配管についてもほぼ同時期から多くのプラントで取替が行われてきている。シュラウド等の補修については、ひび除去(EDM)+応力改善(ピーニング等)、タイロッドによる補修など、PLR配管の補修については、ひび除去+応力改善(IHSI等)を行っている。

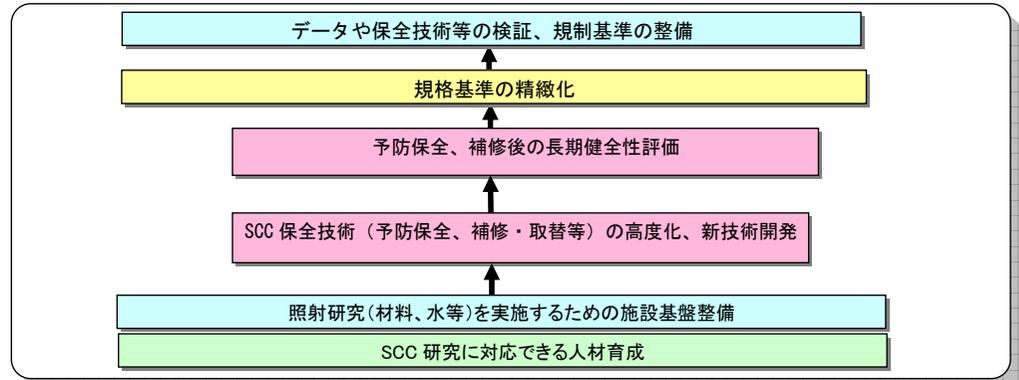
PWRにおいては、1996年の高浜1号機の上蓋取替(690合金へ)を始めとして、いくつかのプラントで上蓋取替が行われている。2004年の大飯3号機上蓋からの漏えいの対策として、690系合金による環境遮断溶接補修を行っている。2003年敦賀2号機の加圧器逃がし弁用管台部で発見されたPWSCCの対策として、管台溶接部(690合金へ)及びセーフエンドの取替を行っている。

BWR、PWRともに、機械的手段による予防保全としては、ショットピーニング、ウォータージェットピーニング、レーザピーニングといったピーニング技術や高周波誘導加熱(IHSI)等による応力改善技術が挙げられる。

高経年化に伴うSCCの発生・進展を予想した対策として、ピーニング等の予防保全に加え、SCCが顕在化する可能性が高い部位から優先的に耐SCC性の高い材料(例えばPWRでの690合金)への取替を行ってきている。しかし、SCC感受性の比較的高い材料(例えばPWRでの600合金)も使用されているので、着実かつ計画的な対応が望まれる。

高経年化対応研究方針

現有技術の改良や、新たな予防保全、補修・取替技術の開発が必要である。また、予防保全、補修・取替を実施した後の検査性の実証は早期に取り組むべき課題であると考えられる。中期的には、そうした対策後の長期にわたる信頼性を実証することが重要な課題である。さらに長期的には、より耐SCC性に優れた材料の適用や、炉内の高照射領域での補修等に適用するための材料・補修技術の開発が必要である



産官学の役割分担

①産業界の役割

—安全性、信頼性、経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備

- ・SCC 保全技術(予防保全、補修・取替等を含む)の高度化、新技術開発
- ・予防保全、補修後の長期健全性評価

②国・官界の役割

—安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
—必要な基盤(知識、人材、施設、制度)の整備
—産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

- ・データや保全技術等の検証、規制基準の整備
- ・学協会規格のエンドース、健全性評価ガイド策定
- ・照射研究(材料、水等)を実施するための施設基盤整備(共同研究の主体者)

③学術界の役割

—知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
—研究を支える人材の育成

- ・SCC 研究に対応できる人材育成(共同研究の主体者)
- ・規格基準の精緻化支援

④学協会の役割

—規格基準化とその高度化に貢献

- ・規格基準の精緻化

産官学の連携

産官学による協調・共同研究が必要な研究課題

・照射研究(材料、水等)を実施するための施設基盤整備

炉内構造物の研究には照射(中性子、ガンマ線)を伴う研究が必要なことから、JMTR等の照射施設基盤整備を産官で協力して推進する。

・SCC 研究に対応できる人材育成

産官学の人的交流を図り、SCC 研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

SCC 保全技術(予防保全、補修・取替等)に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
SCC 保全技術(予防保全、補修・取替等)の高度化、新技術開発	炉内 SCC 腐食環境評価手法の高度化・標準化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内腐食環境の部位ごと評価手法の標準化、高度化 ・ 規格基準の整備 	産/産
	SCC 環境緩和技術の開発、高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内腐食環境緩和技術の改良、開発 (貴金属注入、ヒドラジン注入等) 	産、学/産
	現有技術の改良、新技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 封止溶接(環境遮断) ・ オーバーレイ溶接等の高度化、適用範囲拡大 ・ 表面残留応力改善技術等の高度化、適用範囲拡大 ・ 補修技術の高度化実証 	産/産
	低 SCC 感受性材料の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高照射場での耐 IASCC 材料等低 SCC 材料の開発 	産、学/産
	高照射場での補修等技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 技術開発 	産、学/産
予防保全、補修後の長期健全性評価	予防保全、補修後の長期健全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補修等による応力、材料評価技術 ・ 長期信頼性評価・モニタリング技術 ・ 維持規格等への反映 	産/産
データや保全技術等の検証、規制基準の整備	照射材補修溶接部の健全性評価手法検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース。 	官/官
	予防保全、補修後の長期健全性検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース。 	官/官
	照射等の施設基盤整備	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中性子照射、ガンマ線照射等の施設基盤整備 	官/官
SCC 研究に対応できる人材育成	SCC 研究に対応できる人材育成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人材育成 	学/学

SCC 保全技術(予防保全、補修・取替等)に係るロードマップ

年 度	第 I 期(初期原子カプラントの 40 年まで)					第 II 期(同 50 年まで)						第 III 期(同 60 年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
SCC 保全技術(予防保全、補修取替等)の高度化、新技術開発	炉内 SCC 腐食環境評価手法の高度化・標準化											低 SCC 感受性材料開発 高照射場での補修等技術開発
	SCC 環境緩和技術の開発・高度化											
	現有技術の改良、新技術開発(封止溶接、表面残留応力改善技術等の高度化)											
予防保全、補修後の長期健全性評価						長期信頼性実証(補修等による応力、材料評価技術、長期信頼性モニタリング技術等)						
データや保全技術等の検証、規制基準の整備	照射材補修溶接部の健全性評価手法検証											
						予防保全、補修後の長期健全性検証						
						照射等施設基盤整備						
規格基準、規制基準への反映	SCC 健全性評価ガイド					維持規格への反映(長期健全性評価)						
	維持規格への反映					<ul style="list-style-type: none"> 腐食環境緩和技術 封止溶接等予防保全技術 						
						SCC 長期健全性評価ガイド						

疲労割れに係る導入シナリオ

疲労割れとは

- ・疲労割れは、繰返し加わる力により金属材料が損傷する現象のことをいう。環境効果(温度、水質等)で劣化が促進されることがわかっている。
- ・疲労は、発生応力と応力変動の繰返しで劣化損傷が累積されるため、供用期間が長期化するほど劣化が進む。

現状分析

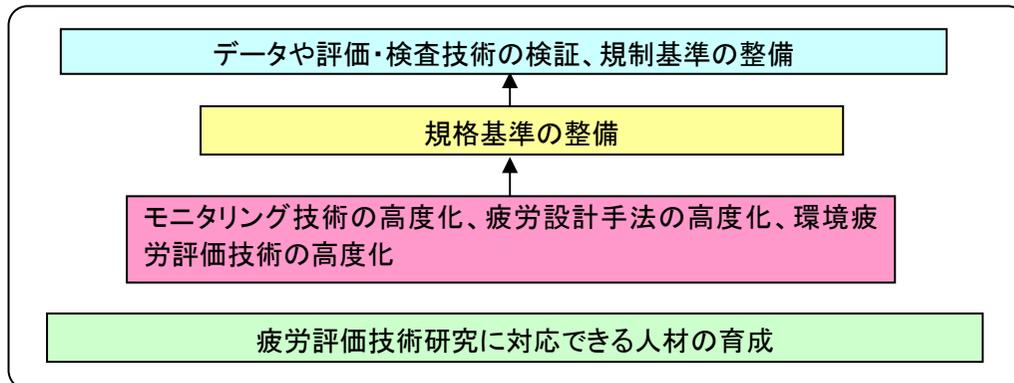
疲労劣化に対しては、設計規格に基づく疲労設計、維持規格等に基づく供用期間中検査と検出されたき裂の評価・補修を行って、健全性を確保する体系が整備されている。長期供用時にもこの方法が適用される。また、高経年化技術評価(PLM評価)には、通産省資源エネルギー庁通達「環境中疲れ寿命評価指針」が適用されている。

大気中の疲労強度については、60年供用を想定した低サイクル疲労設計の高経年化技術評価の結果、過渡の実績頻度に基づく過渡回数は設計過渡回数を超えていない。高サイクル疲労については、主要耐圧部材料では経年的な損傷事例の増加は認められていないが、 10^6 サイクルを超える高サイクル領域については、定量的な疲労試験データは無い。

環境中の疲労強度は、機械学会で規格化され、規格が高経年化技術評価に適用されようとしている。環境疲労については、疲労とSCCの重畳、クラッド施工部の評価などの課題が残されており、今後、検討する必要がある。

高経年化対応研究方針

現在までに発生はしていないものの、今後、顕在化する可能性を念頭において環境疲労評価の高度化等を進める必要がある。



産官学の役割分担

① 産業界の役割

- －安全性・信頼性・経済性の確保・向上を目的とした開発研究及び基盤整備

② 国・官界の役割

- －安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- －必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備
- －産業界・学术界の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

③ 学术界の役割

- －知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
- －研究を支える人材の育成

④ 学協会の役割

- －規格基準化とその高度化に貢献

- ・モニタリング技術の高度化
- ・疲労設計手法の高度化
- ・環境疲労評価技術の高度化

- ・データや評価・検査技術の検証、規制基準の整備

- ・疲労評価技術研究に対応できる人材の育成
- (・規格基準の精緻化支援)

- ・規格基準の整備

産学官の連携

産学官による協調・連携が必要な課題

・疲労評価技術に対応できる人材の育成

産学官の人的交流を図り、疲労評価技術に対応できる幅広い能力を有する人材を育成する。

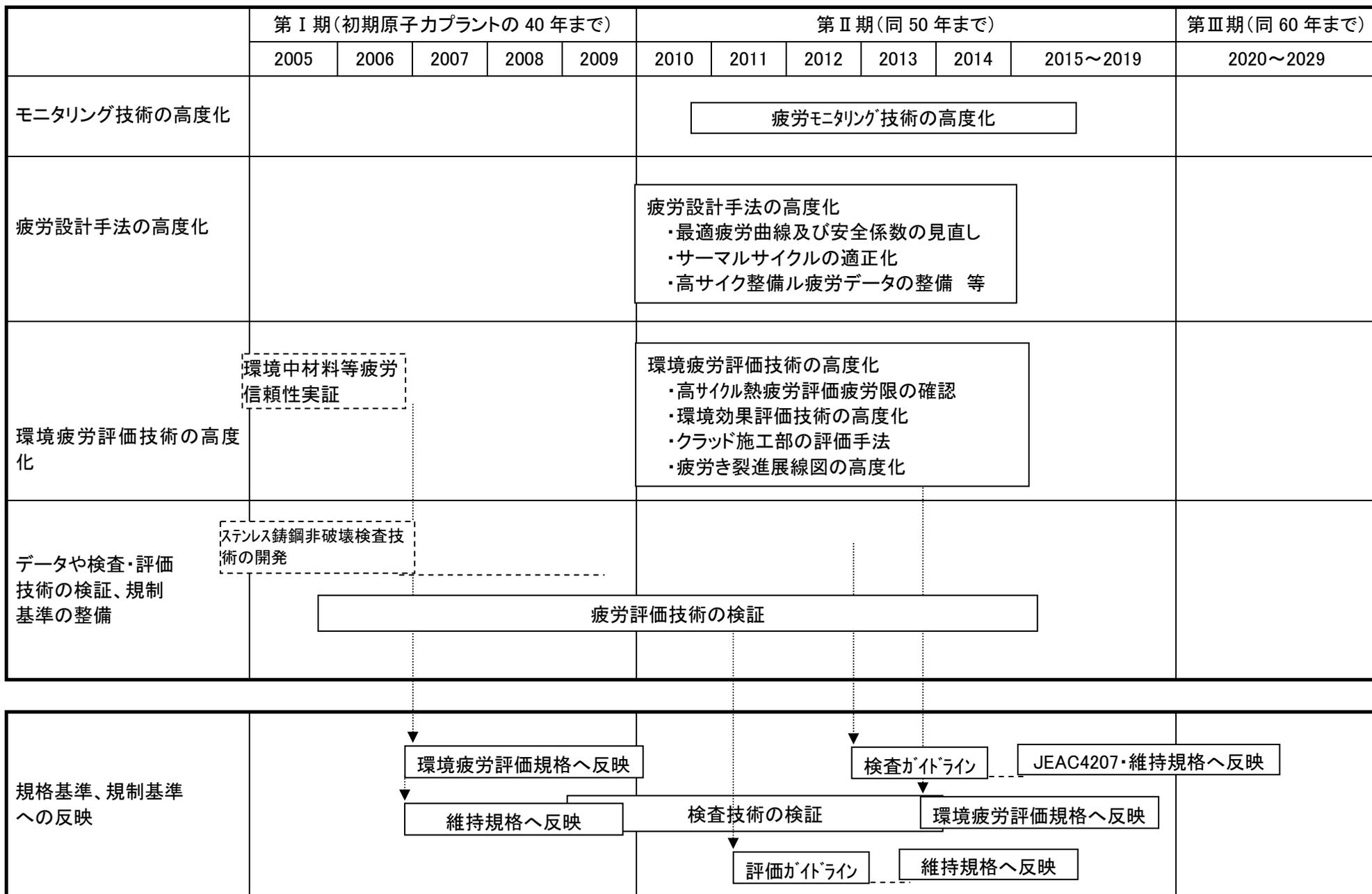
疲労割れに係る技術マップ（1/2）

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施／資金)
モニタリング技術の高度化	疲労モニタリング技術の高度化	実機に適用されている疲労モニタの運用実績を踏まえ、累積疲労損傷をより広範囲かつ高精度でモニタできる高度化システムを開発する。	産／産
疲労設計手法の高度化	最適曲線および安全係数の見直し	大気中の最適曲線を、JNES の研究成果を基に見直す。安全係数の見直しについても同様。	産／産
	サーマルサイクルの適正化	運転実績を踏まえ、過渡の内容、回数を見直しを行い、設計に適用しているサーマルサイクルの適正化を検討する。	
	高サイクル疲労データの整備	10 ⁶ サイクルを超える高サイクル疲労データを取得し、大気中設計疲労曲線への反映を検討する。	
	Master カーブ法の検討	ASME Sec VIII Rewrite で提案されている Master カーブ法の設計疲労曲線への反映について検討する。	
環境疲労評価技術の高度化	高サイクル熱疲労評価に係る疲労限の確認	各鋼種(炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼、Ni 基合金)について、疲労限(ひずみ振幅の疲労発生下限値)を設定する。	産／産
	環境効果評価技術の高度化	試験片サイズ、ひずみ保持、疲労と SCC の重畳、き裂発生メカニズム等について、環境疲労評価への影響を検討し、評価技術の高度化を図る。	
	クラッド施工部の評価手法	原子炉圧力容器等のクラッド施工部は、強度部材でないことから疲労評価の対象となっていないが、環境疲労評価上、重要な部位であり、評価手法を確立する必要がある。	
	疲労き裂進展線図の高度化	環境中疲労き裂進展線図に関し、BWR 環境中の下限界応力拡大係数等、未整備データの拡充を図り、き裂進展線図の見直しを行う。	

疲労割れに係る技術マップ (2/2)

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施／資金)
データや評価・ 検査技術の検 証、規制基準の 整備	検査技術の検証	ステンレス鋳鋼に対して検出性、サイジング技術の向上を図った非破壊検査技術について、データや検査技術の検証、規制基準の整備を行う。	官／官
	疲労評価技術の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・疲労設計手法の高度化、疲労発生に係る環境疲労評価技術、疲労き裂進展に係る環境疲労高度化技術を検証し、規制基準の整備を行う。 ・照射材補修溶接後の健全性評価においては、補修後の疲労強度に及ぼす内在欠陥の影響を評価検証し、規制基準の整備を行う。 	
(注) ステンレス鋳鋼以外の検査は、SCC欠陥検査のロードマップに準じる。 <small>ハナコダテ</small>			学／学

疲労割れロードマップ



絶縁劣化の健全性評価に係る導入シナリオ

絶縁劣化とは

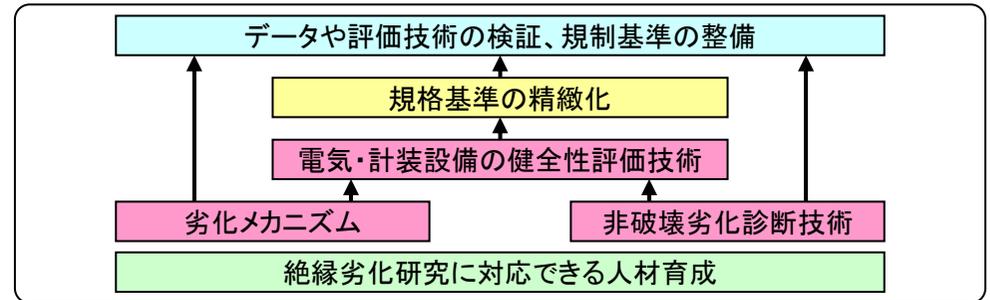
電気・計装設備においては、その通電部位と大地間、あるいは通電部位と他の通電部位との電氣的独立性(絶縁性)を確保するため、電気抵抗の大きい材料(絶縁物)を介在させているが、その材料が環境的(熱・放射線等)、電氣的及び機械的な要因で劣化し、電気抵抗が低下することにより電氣的独立性(絶縁性)を確保できなくなる場合がある。このような現象を絶縁低下と称し、この現象は時間の経過とともに進展する事象である。

現状分析

- ・現在のケーブル健全性評価手法は、産業界等の研究成果及び米国の IEEE 規格に基づき昭和 57 年に取りまとめられたが、近年の知見によると供用期間中の劣化を模擬するための加速劣化手法等にいくつかの課題があり、このため、ケーブルを対象として実機条件に即した経年変化評価手法を検証することを目的に、平成 14 年度から国プロとして「原子力発電所のケーブル経年変化評価技術調査研究」が実施され、平成 18 年 12 月に中間報告書が発行された。この評価によると、最も厳しいと想定される使用環境(原子炉格納容器内: 温度 66°C、線量率 0.5Gy/h)で供用後の設計想定事故を考慮した場合、一部のケーブルについては供用期間を短く制限する必要があるとされている。この評価結果を踏まえ、産業界ではケーブル使用環境調査、実機ケーブルを用いた試験を計画している。
- ・ケーブル絶縁劣化に対する検査・モニタリング技術については、通常運転時の劣化に対応した絶縁抵抗測定等の電氣的手法による劣化診断技術はあるものの、供用後の設計想定事故を考慮した劣化診断技術は確立されておらず、非破壊劣化診断技術の高度化が必要である。
- ・ケーブル評価技術及び検査・モニタリング技術のベースとなる絶縁体の劣化メカニズムについては、過去に産業界等で種々な研究がなされているものの、メカニズムには諸説があり、評価技術が科学的に裏付けられてはいない。
- ・設計想定事故環境で機能要求がある電動弁及び原子炉格納容器電線貫通部等の電気・計装設備の絶縁劣化に対する評価は、現在、米国の IEEE 規格等に準拠して実施されているが、我が国として規格化された評価手法は定められておらず、現在、国からの要請により電気協会において既存の知見等に基づき規格化が検討されている。
- ・電気・計装設備の補修・取替及び絶縁劣化に関する緩和措置(環境緩和)に関しては、必要に応じて対処されており、現時点で大きな課題はない。

高経年化対応研究方針

電気・計装設備の使用環境を把握し、設計想定事故環境で機能要求があるケーブル、電動弁及び原子炉格納容器電線貫通部等の電気・計装設備の絶縁劣化に対する実機条件に即した評価手法を確立するとともに、非破壊劣化診断技術の高度化及び劣化メカニズムの検証を行い、規格基準に反映するとともに規制に活用して電気・計装設備の長期に亘る信頼性を向上させる。



産官学の役割分担

- ① 産業界の役割
 - －安全性・信頼性・経済性の確保・向上を目的とした開発研究および基盤整備
 - ・電気・計装設備の健全性評価技術
 - ・劣化メカニズム (共同研究の主体者)
 - ・非破壊劣化診断技術 (共同研究の主体者)
- ② 国・官界の役割
 - －安全規制における適切な行政判断に必要な安全研究
 - －必要な基盤(知識・人材・施設・制度)整備
 - －産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援
 - ・データや評価技術の検証、規制基準の整備
- ③ 学術界の役割
 - －知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
 - －研究を支える人材の育成
 - ・絶縁劣化研究に対応できる人材育成 (規格基準の精緻化支援)
- ④ 学協会の役割
 - －規格基準化とその高度化に貢献
 - ・規格基準の精緻化

産官学の連携

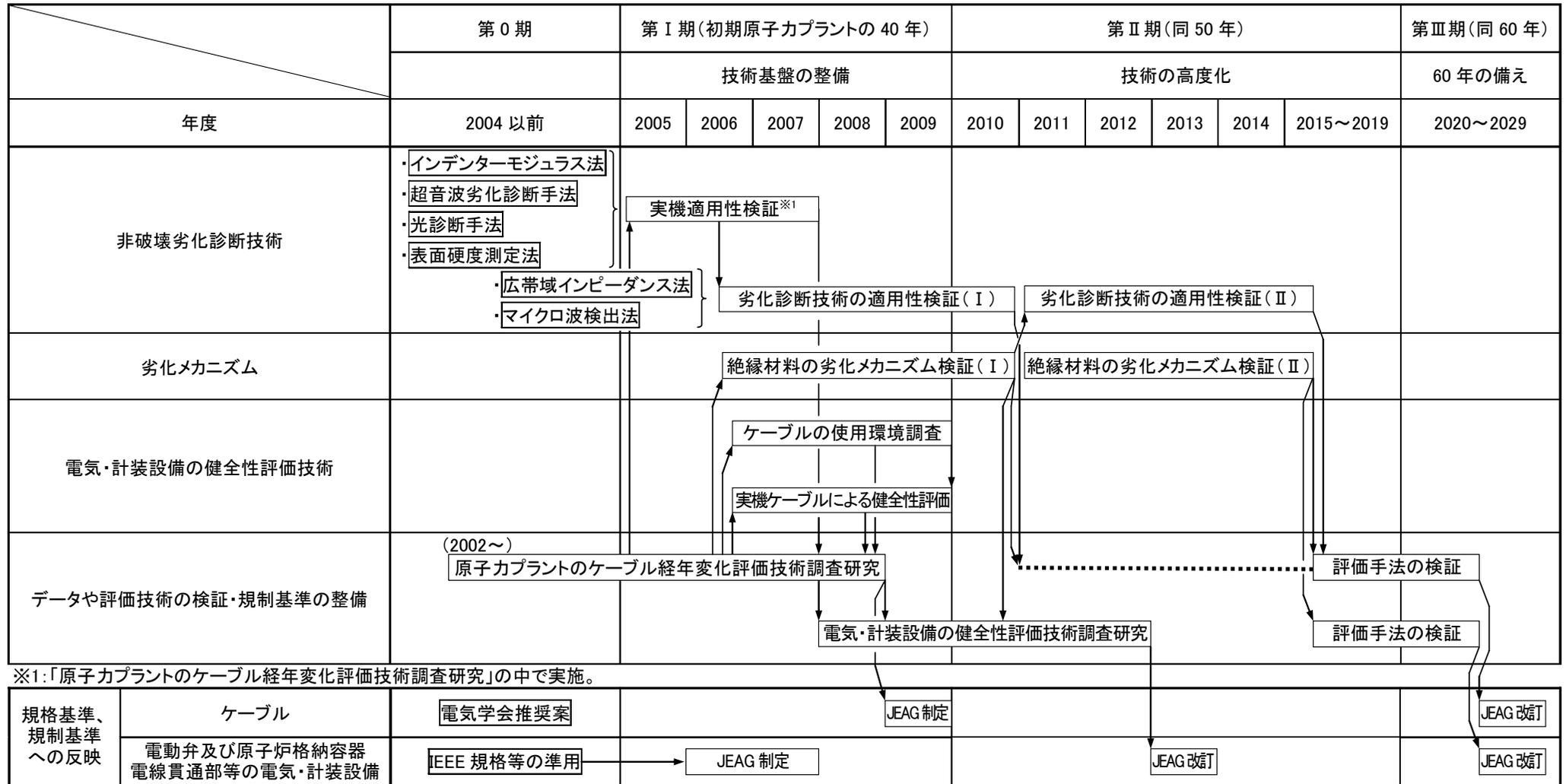
産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

- ・劣化メカニズム
- ・非破壊劣化診断技術
- これらは産官ともに必要で、学の研究ポテンシャルを踏まえて産学官で協調して効率化する。
- ・絶縁劣化研究に対応できる人材育成
- 産官学の人的交流を図り、絶縁劣化研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

絶縁劣化の健全性評価に係わる技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施／資金)
非破壊劣化診断技術	ケーブル非破壊劣化診断技術の適用性	現在開発されているケーブル劣化診断技術の実機適用性検証	官／官
		広範囲に亘ってケーブルの劣化診断が可能な要素技術を含む非破壊劣化診断要素技術の適用性検証	学官／官
劣化メカニズム	劣化メカニズム	絶縁材料の実機環境における劣化メカニズムの検証	学官／官
電気・計装設備の健全性評価技術	電気・計装設備の実機条件に即した健全性評価手法の見直し	ケーブルの使用環境調査	産／産
		実機ケーブルによる健全性評価	産／産
データや評価技術の検証、規制基準の整備	電気・計装設備の実機条件に即した健全性評価手法の検証	実機条件に即したケーブル健全性評価手法の検証	官／官
		実機条件に即したケーブル健全性評価の知見に基づく、設計想定事故環境で機能要求がある電動弁及び原子炉格納容器電線貫通部等の電気・計装設備の健全性評価手法の検証	官／官
絶縁劣化研究に対応できる人材育成	絶縁劣化研究に対応できる人材育成	絶縁劣化研究に対応できる人材育成	学／学

絶縁劣化の健全性評価に係わるロードマップ



※1:「原子カプラントのケーブル経年変化評価技術調査研究」の中で実施。

配管減肉に係る導入シナリオ

配管減肉とは

- ・管内流体の流れに起因して、肉厚が経年的に減少する現象。
- ・腐食(コロージョン)による化学的作用が流れの作用により助長されるものと配管内に飛散する液滴やキャビテーション等の流体の力(エロージョン)による機械的作用によるものがある。

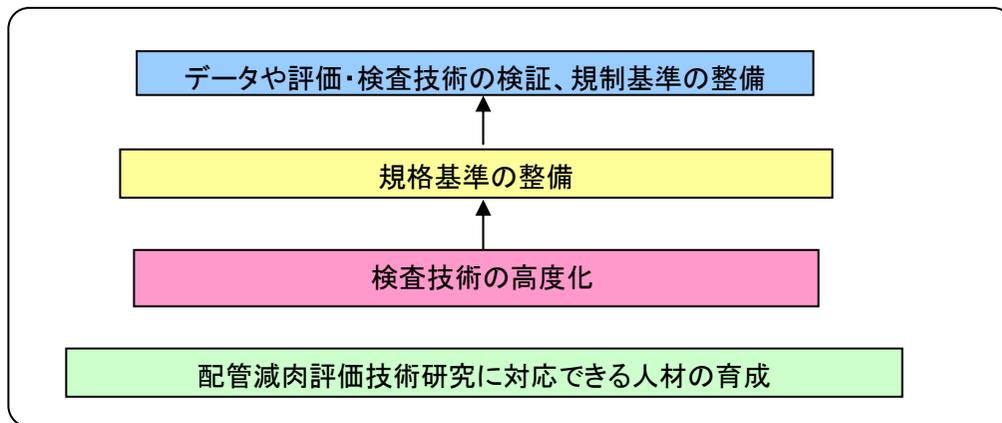
現状分析

配管減肉については、原子力・安全保安院指示文書「原子力発電所の配管肉厚管理に対する要求事項について(平成17年2月18日)」において、日本機械学会に技術規格策定の要請が出され、日本機械学会で「配管減肉管理に関する技術規格 2006年版(2006年11月)」が整備された。本規格では、配管減肉事象の要因を腐食(コロージョン)による化学的作用が流れの作用により助長されるものと配管内に飛散する液滴やキャビテーション等の流体の力(エロージョン)による機械的作用によるものとで分析整理し、減肉管理の対象とすべき事象として、流れ加速腐食、液滴エロージョン及びフラッシングエロージョンを選定している。

上記のとおり、原子力プラントにおける配管減肉管理の基本方針は規格として整備されている。高経年化プラントにおける配管減肉は、比較的緩やかに進行すると評価されている配管系統・範囲の減肉が顕著になり、量的・面的に拡大していくところに特徴づけられると予想されている。このため、①長期運転状況における減肉発生状況の正確な把握、②長期運転における減肉点検、取替・補修計画の確立、③減肉メカニズムの解明に貢献する研究を実施していくことが必要である。上記機械学会の減肉管理規格は、①、②については、よりどころを与えるものである。③については、産学官において知見の収集整備が進められている。

高経年化対応研究方針

今後は、配管減肉管理の信頼性向上のため、評価手法の妥当性確認並びに精緻化のための各種データ・知見の収集等を行っていくものとする。



産官学の役割分担

① 産業界の役割

- －安全性・信頼性・経済性の確保・向上を目的とした開発研究及び基盤整備

・検査技術の高度化

② 国・官界の役割

- －安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- －必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備
- －産業界・学术界の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

・データや評価・検査技術の検証、規制基準の整備

③ 学术界の役割

- －知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
- －研究を支える人材の育成

・配管減肉評価技術研究に対応できる人材の育成
(・規格基準の精緻化支援)

④ 学協会の役割

- －規格基準化とその高度化に貢献

・規格基準の整備

産学官の連携

産学官による
協調・連携が
必要な課題

・配管減肉評価技術研究に対応できる人材の育成
産学官の人的交流を図り、疲労評価技術に対応できる幅広い能力を有する人材を育成する。

配管減肉に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施／資金)
検査技術の高度化	板補強部の検査技術開発	板補強を施した部位の減肉測定技術を開発する。	産／産
データや評価・検査技術の検証、規制基準の整備	配管減肉評価技術の検証	配管減肉管理技術(予測、評価、検査等)の妥当性を検証するための各種データ・知見の収集を行う。	官／官
人材育成		配管減肉評価技術研究に対応できる人材の育成	学／学

配管減肉に係るロードマップ

	第Ⅰ期(初期原子カプラントの40年まで)					第Ⅱ期(同50年まで)						第Ⅲ期(同60年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~2019	2020~2029
検査技術の高度化	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">板補強部の検査技術開発</div>											
データや評価・検査技術の検証、規制基準の整備	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">配管減肉評価技術の検証</div>											

規格基準、規制基準への反映	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">△PWR 配管減肉管理規格 2006年版(JSME S NG1)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">△BWR 配管減肉管理規格 2006年版(JSME S NH1)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">技術評価</div> <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> → <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; display: inline-block; margin-left: 10px;">改訂 技術評価</div> </div>
---------------	--

コンクリートの強度低下の健全性評価に係る導入シナリオ

コンクリートの強度低下とは

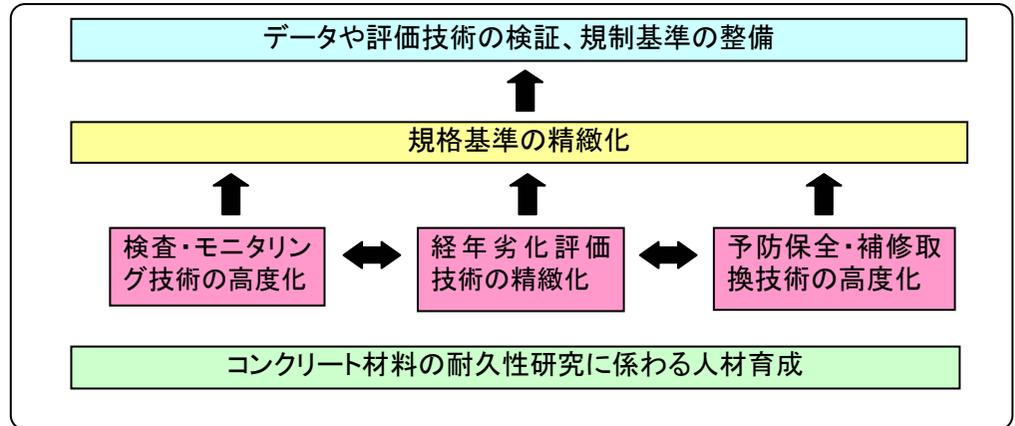
- ・中性化、塩分浸透、アルカリ骨材反応、化学的侵食、凍結融解等の劣化要因によりコンクリートにひび割れが進展し、鉄筋が腐食することで、コンクリート構造としての強度、耐力を低下させる。
- ・主な劣化要因は、コンクリート構造物の外面から作用するものが多いが、海砂利用による塩化物イオンやアルカリ骨材反応のように材料に起因するものもある。
- ・沿海地域での飛沫塩や、寒冷地での凍結融解のように立地環境で劣化要因・進展速度が異なる。

現状分析

- ・コンクリート構造物は適切に施工、保全すれば、100年程度の耐久性があるとされている。
- ・現在13プラントの高経年化技術評価が実施されたが、コンクリート劣化が大きな問題になったのはアルカリ骨材反応の発生が見られた1プラントのみである。しかしながらコンクリートの経年劣化状況を的確に傾向監視している事業者はまだ少なく、経年劣化検査・評価・保全の各分野で高度化が必要である。
- ・原子力発電所施設のコンクリートの健全性評価には、一般建物や土木構造物の健全性評価手法を参考とするが、原子力施設特有の条件を踏まえた安全研究は必ずしも十分であるとは言えない。
- ・原子力発電所特有の経年劣化事象には、熱と放射線照射による強度低下があるが、放射線照射による強度低下については、評価値の妥当性が検証されていない状態である。また、伊方1号機の審査では、始めて健全性評価で二次評価が実施されたが、劣化状況の耐力評価法や判断基準である要求機能の内容を標準化する必要がある。
- ・一方、学協会の動向として、現在、日本建築学会では、「原子力施設における建築物の維持管理指針(案)」の策定作業を実施している。平成19年度末には取りまとめられる予定であり、民間で始めて原子力施設の維持管理に対する基本的考え方がまとめられる予定である。また、コンクリート構造物としては、重要度が高いコンクリート製原子炉格納容器が第Ⅱ期(2017年)に30年目を迎える。これに備え、機械学会では平成19年度からCCV規格に維持管理編を追加する動きがあり、規制側も対応する必要がある。

高経年化対応研究方針

- ・国は高経年化技術評価に当たり、妥当性確認が十分でない評価値(放射線照射影響)や充実が必要と考えられる評価手法(健全性二次評価法)等について重点的に検証・整備する必要がある。
- ・一方、産業界では、自らのプラントの維持管理の高度化に関連する研究や民間規格策定の為の研究、これまでの高経年化技術評価で課題になった項目の研究を実施する必要がある。
- ・学術界では産官が研究を進めるに当たり、例えば中性化とひび割れの関係を整理し中性化評価の高度化を図るような、基礎的知見を高度化する研究を実施することが期待されており、また、大きな役割としてコンクリート材料分野での人材を育成することが望まれる。
- ・学協会では、産学官の研究等で実施された知見を総合し、必要な時期に新たな民間規格を策定していくことが期待される。



産学官の役割分担案

①産業界の役割

—安全性・信頼性・経済性の確保・向上を目的とした開発研究および基盤整備

- ・検査・モニタリング技術の高度化
- ・経年劣化評価技術の精緻化
- ・予防保全・補修取換技術の高度化

②国・官界の役割

—安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
—必要な基盤(知識、人材、施設、制度)の整備
—産業界・学術界の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

- ・データや評価技術の検証、

③学術界の役割

—知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
—研究を支える人材の育成

- ・コンクリート材料の耐久性研究に係わる人材の育成

④学協会の役割

—規格基準化とその高度化に貢献

- ・規格基準の精緻化

産学官の連携

- ・規格基準の精緻化
(建築学会原子力建築小委員会での「原子力施設における建築物の維持管理指針(案)」等の検討)

コンクリートの強度低下の健全性評価に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
データや評価技術の検証、 規制基準の整備	検査・モニタリング手法の 検証	一般構造物用に開発された非破壊検査手法について、大断面、高密度配筋、熱及び放射線影響を有する原子力発電所施設への適用時有効性を検証する。	官 / 官
	健全性に関する評価技術 の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れが生じた場合の中性化と鉄筋腐食の評価手法を検討する。 ・放射線(中性子線・ガンマ線)影響の評価値を検証する。 ・健全性二次評価手法に関する基準案を整備するための基礎データを取得する。 ・コンクリート製原子炉格納容器の高経年化技術評価手法を検討する。 	官 / 官
検査・モニタリング技術の 高度化	劣化モニタリングの高度 化検討	現在開発中の先進技術を駆使したコンクリート構造のモニタリング技術等の適用性を検討する。	産 / 産
経年劣化評価技術の精緻 化	複合劣化に関する評価法 の検討	現在、高経年化技術評価では単一劣化要因毎に技術評価しているが、現在、学会で検討中の複合劣化の評価法を、原子力発電所施設の健全性評価に反映させる。	産 / 産
	確率的手法を用いた高経 年化評価法の検討	コンクリート構造物の経年劣化を確率的に評価し、健全性評価手法を整備する。	産 / 産
	機器とのインターフェース 部の健全性評価	コンクリートの経年劣化が各種機器の各種の支持形態にどのような影響を及ぼすかを把握する。	産 / 産
予防保全・補修取換技術 の高度化	補修方法の標準化・高度 化	一般構造物における各種補修方法の、原子力発電所施設への適用性を調査し、原子力発電所施設の補修に係わる標準を整備し、保全手法の高度化を図る。	産 / 産
コンクリート材料の耐久性 研究に係わる人材育成	耐震安全性評価研究に 対応できる人材育成	コンクリート材料の耐久性に係わる研究を実施できる研究者・技術者を育成する。	学 / 学

コンクリートの強度低下の健全性評価に係るロードマップ

	第Ⅰ期(初期原子カプサルの40年まで)					第Ⅱ期(同50年まで)						第Ⅲ期(同60年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015～2019	2020～2029
データや評価技術の検証、規制基準の整備	検査・モニタリング手法の検証											
		健全性に関する評価技術の検証										
検査・モニタリング技術の高度化											劣化モニタリングの高度化検討	
経年劣化評価技術の精緻化						複合劣化に関する評価法の検討						
										確率的手法を用いた高経年化評価手法の検討		
										機器とのインターフェース部の健全性評価		
予防保全・補修取換技術の高度化						補修方法の標準化・高度化						
コンクリート材料の耐久性研究に係わる人材育成	耐震安全性評価研究に対応できる人材育成											

その他（ステンレス鋳鋼の熱時効）に係る導入シナリオ

ステンレス鋳鋼の熱脆化とは

- ・ステンレス鋳鋼（二相ステンレス鋼）は、軽水炉の運転温度で熱時効し脆化する。
- ・熱時効でフェライト相が脆化するので、フェライト量が多い材料ほど脆化する。時効温度が高いほど、時効時間が長いほど脆化する。
- ・ステンレス鋳鋼は、原子炉冷却材圧力バウンダリーの大型ポンプ、配管、弁などに使用されている。

現状分析

検査、監視

- ・実機の欠陥検査は、供用期間中検査としてUT等が行われている。熱脆化の監視は行われていない。
- ・ステンレス鋳鋼に適用しているUTによる欠陥検出性は確認されている。欠陥のサイジング性は確認できていない。

健全性の評価

- ・フェライト量、時効温度、時効時間により脆化予測する式が開発されている。予測式は加速熱時効試験により得られたデータに基づいている。実機の熱時効条件による予測式の検証は行われていない。
- ・有意な欠陥指示のないステンレス鋳鋼の健全性は、欠陥検出性と脆化予測式を用いて評価することができる。有意な欠陥指示がある場合には、欠陥サイジング性が未確認のため、健全性評価はできない。

補修

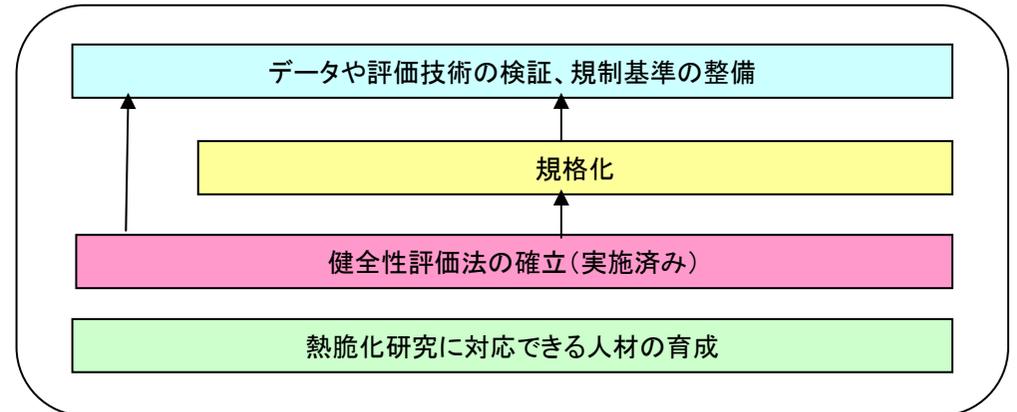
- ・現時点で補修に関する研究ニーズは抽出されていない。

規格、基準

- ・熱脆化予測式は規格化されていない。
熱脆化を考慮した健全性評価法は一般的な破壊力学的な評価が適用できる。

高経年化対応研究方針

脆化予測式の実機時効材による検証をおこなう。その結果により必要に応じて脆化監視について検討する。検査性の改善が必要で、特にサイジング性の良いUT法を開発する必要がある。（検査は疲労のロードマップで対応）



産官学の役割分担

①産業界の役割

- －安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究及び基盤整備

健全性評価法の確立(済み)

②国・官界の役割

- －安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- －必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備
- －産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

・データや評価技術の検証、規制基準の整備

③学術界の役割

- －知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)
- －研究を支える人材の育成

・熱脆化研究に対応出来る人材の育成

④学協会の役割

- －規格基準化とその高度化に貢献

・規格化

ステンレス鋳鋼の熱時効に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
データや評価技術の検証、規制基準の整備	実機データによる脆化予測式の検証	加速熱時効された材料のデータに基づく脆化予測式の、実機時効条件の材料データによる検証	官/官
人材育成	熱脆化研究に対応できる人材の育成	人材育成	学/学

ステンレス鋳鋼の熱脆化に係るロードマップ

	第Ⅰ期(初期原子力プラントの40年まで)					第Ⅱ期(同50年まで)						第Ⅲ期(同60年まで)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015～2019	2020～2029
データや評価技術の検証、規制基準の整備	民間研究等		実機データによる脆化予測式の検証									

規格基準、規制基準の整備	△技術審査マニュアルの制定					△技術審査マニュアルの見直し						
--------------	---------------	--	--	--	--	----------------	--	--	--	--	--	--

耐震安全性評価に係る導入シナリオ

耐震安全性評価とは

- 対象とする機器の耐震クラスに応じて、機器に作用する地震力を設定する。
- 耐震安全性向上着目すべき経年劣化事象を選定し、モデル化する（図1に示す配管の減肉に対する評価例では、モデル化を2段階で行っている）。
- 経年劣化事象の振動特性に対する影響を加味して、機器に作用する荷重等を算定する。
- 経年劣化事象の強度特性に対する影響を加味して、許容限界を設定する。
- 地震荷重と内圧等他の荷重を組合せた上で、許容限界以下となるか評価する。

第1段階評価（必要最小肉厚による評価）

エルボ部、レデューサ部、オリフィス等の偏流部及び下流2D（オリフィスは3D）に、周方向、軸方向一様の必要最小肉厚を想定（左下図の太線部）

等価剛性を有する3次元はりモデル作成

耐震クラスに応じた解析で荷重／モーメントを算出

ライン中の最大発生応力／許容応力の比を算出

許容値：1以内か

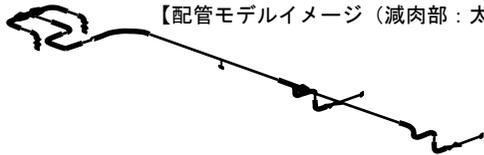
Yes

耐震性確保

第2段階評価（実測データによる評価）

図1 炭素鋼配管の減肉に対する評価例

【配管モデルイメージ（減肉部：太線）】



現状分析

設計及び建設時の原子力設備の耐震設計に係る基本的考え方は「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会 昭和56年、以下、「指針」という）に定められており、本指針に適合するように制定された「原子力発電所耐震設計技術指針」（日本電気協会 JEA4601、以下「JEA」という）に基づいて耐震性に関する詳細設計が行われてきている。他方、近年、炉内構造物や再循環系配管等で経年劣化事象（応力腐食割れ等）が多数報告されたことから、「発電用原子力設備規格 維持規格」（日本機械学会 2004年改訂版、以下、「維持規格」という）が発行され、シュラウドおよびシュラウドサポートの健全性評価規格等が策定された。これらの健全性評価では、地震力も考慮されている。また、平成16年（2004年）に美浜3号機で減肉した配管からの蒸気噴出事故が発生したことも契機となり、「発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格（日本機械学会 2006年、以下、「減肉管理規格」という）」と沸騰水型原子力発電所の減肉管理規格が発行されたが、耐震安全性を含めた健全性評価の規格制定には至っていない。さらに、原子力発電所の高経年化対策の実施方法を規定した「原子力発電所の高経年化対策実施基準（日本原子力学会）」が制定手続きの段階にあり、ここでは、PWRプラントでの機器やコンクリート構造物等の既往評価を例に耐震安全性の評価に言及している。

このような状況にあって、平成18年（2006年）に、地震学及び地震工学に関する新たな知見の蓄積並びに原子炉施設の耐震設計技術の改良及び進歩を受けて、指針が改定（以下、「新指針」という）されたことから、新設プラントだけではなく、既設プラントについても耐震重要度の高い設備の耐震安全性評価（以下、「バックチェック」という）が進行中である。高経年化技術評価でも、バックチェックの結果を踏まえて耐震安全性の再評価を行うことになっている。

新指針の特徴としては、i) 基準地震動の見直し、ii) 耐震重要度分類の統合、iii) 従来の水平方向に加えて鉛直方向の基準地震動を策定、等が挙げられる。このため、JEAも対応する項目についての改訂作業を進めている。経年劣化事象の影響を加味した耐震安全性評価においても、既往の評価技術の見直しが必要になる。なお、新指針では、安全審査とは別に、「残余のリスク」として設計地震動を上回る地震動の影響についての定量的評価が要望されている。今後は、経年劣化事象の確率論的な評価を含めた耐震安全性の評価も必要になる。

高経年化対応研究方針

高経年化に伴う経年劣化事象の振動特性や強度特性に対する影響を適切に加味した耐震安全性評価技術の整備を進める。それらの成果を反映して、規格基準の精緻化、また、科学的合理性をもった規制基準の整備等につなげる。そのために必要な耐震安全性評価研究に対応できる人材育成も行う。

データや評価技術の検証、規制基準の整備

規格基準の精緻化

耐震安全性評価技術の整備

耐震安全性評価研究に対応できる人材育成

産官学の役割分担

① 産業界の役割

— 安全性・信頼性・経済性の確保・向上を目的とした開発研究及び基盤整備

・耐震安全性評価技術

② 国・官界の役割

— 安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
— 必要な基盤（知識、人材、制度）の整備
— 産学の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

・データや評価技術の検証
・規制基準の整備

③ 学術界の役割

— 知の蓄積と展開（安全基盤研究の検証）
— 研究を支える人材の育成

・耐震安全性評価研究に対応できる人材育成
・規格基準の精緻化支援

④ 学協会の役割

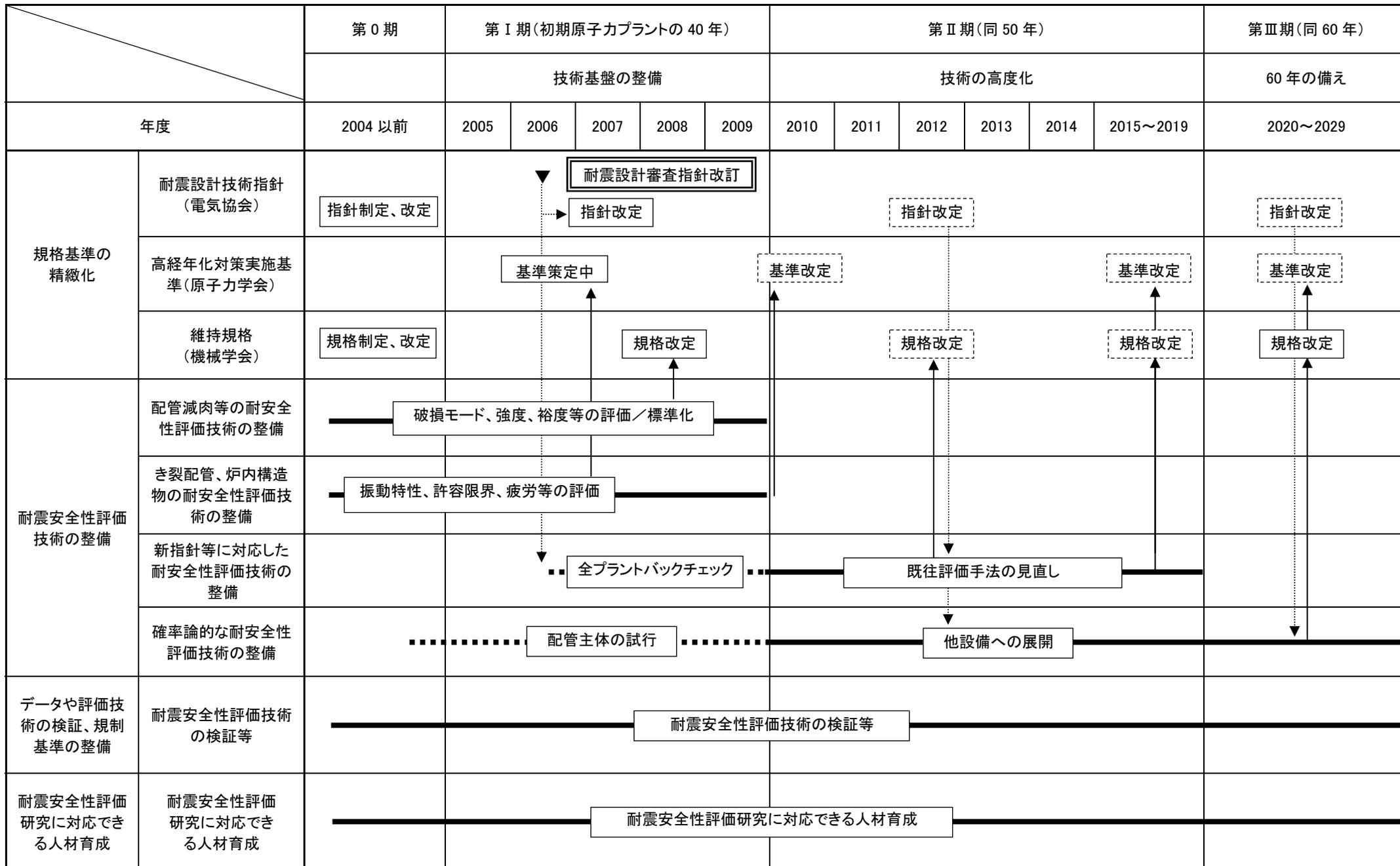
— 規格基準化とその高度化に貢献

・規格基準の精緻化

耐震安全性評価に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
耐震安全性評価 技術の整備	配管減肉等の耐震安全性評価技術の整備	耐震安全性を含めた健全性評価技術の標準化等の観点から、プラント運転開始後の減肉管理設計評価基準等に関する耐震安全性評価技術の整備を行う。	産 / 産
	き裂配管、炉内構造物の耐震安全性評価技術の整備	国内でのき裂を有する炉内構造物、配管の既往研究は破損モード、終局強度に関する研究にほぼ限定されるので、維持規格の補強等の観点から、振動特性、許容限界、疲労の取扱いに関する耐震安全性評価技術の整備を行う。	産 / 産
	新指針等に対応した耐震安全性評価技術の整備	経年劣化事象の扱いにおいてより合理的なモデル化等が重要になるので、バックチェック実績や経年劣化事象等について今後得られる新知見に対応した耐震安全性評価技術の見直し、整備を行う。	産 / 産
	確率論的な耐震安全性評価技術の整備	き裂や減肉といった経年劣化事象や地震動の確率論的取扱いに必要となるデータは十分とはいえず、現時点では試行段階にあるので、関連データの蓄積を図るとともに、配管以外への展開も見据えて、確率論的な耐震安全性評価技術の整備を行う。	産 / 産
データや評価技術の検証、規制基準の整備	耐震安全性評価技術の検証等	配管減肉やコンクリート構造物等の耐震安全性に係る学協会規格のデータや評価技術を検証し、規制基準としてエンドース、規制の高度化を行う。	官 / 官
規格基準の精緻化	耐震安全性評価技術に係る規格基準の精緻化	耐震安全性評価技術の整備結果の標準化を進め、規格基準の精緻化を行う。	学協会 / 学協会
耐震安全性評価研究に対応できる人材の育成	耐震安全性評価研究に対応できる人材育成	耐震安全性評価技術の整備、検証等に資するため、耐震安全性評価研究に対応できる人材を育成する。	学 / 学

耐震安全性評価に係るロードマップ



6. 規格基準類の整備に係る導入シナリオ

「規格基準類の整備計画」の必要性

平成 18 年度より国による「高経年化対策基盤強化整備事業」が開始され以下の4つの基盤整備が必要

- ① 情報基盤整備
- ② 安全基盤研究の実施、
- ③ 保全高度化の実施運用
- ④ 規格・基準基盤の整備

情報基盤の構築、高経年化対応安全基盤研究の実施とともに規格・基準の体系的整備を行い安全規制とシームレスに連携した規格体系を構築し将来の保全プログラムへ反映することが必要

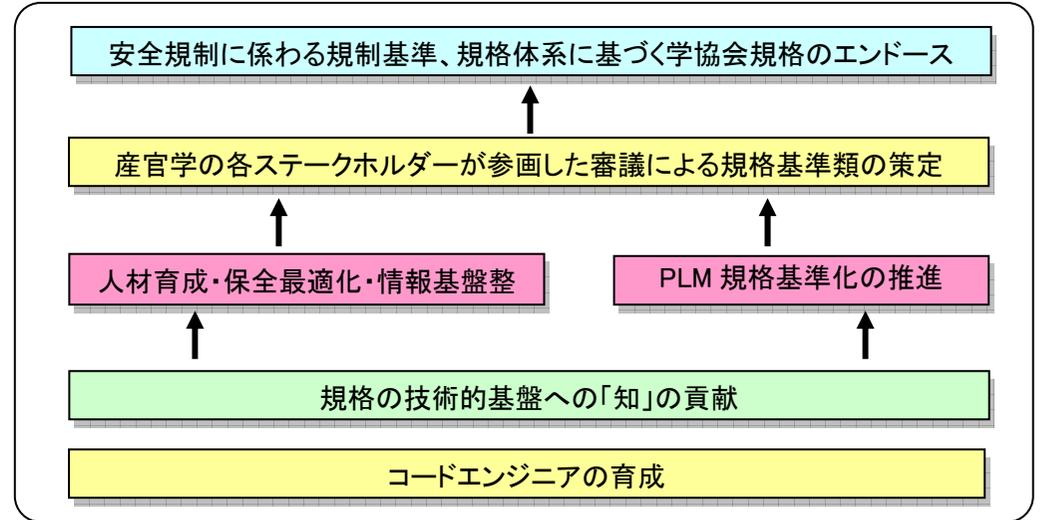
現状分析

- ・ 日本原子力学会、日本機械学会、日本電気協会の三学協会の策定した規格・基準類は 107 件。
- ・ 高経年化及び保守管理に関する規格・基準の体系的整備計画が高経年化対策検討委員会で保全のあり方が検討されている。
- ・ 日本原子力学会、日本電気協会及び日本機械学会は、規制から学協会規格・民間規格までのシームレスな規制・規格体系の開発整備するため、「原子力発電所の高経年化対策実施基準」、「原子力発電所の保守管理規程」、「維持規格」、及び「原子力発電所の定期安全レビュー実施基準」を整備・改訂作業を実施している。

戦略的シナリオ

- ・ 国民への説明性の向上
「公正」「公平」「公開」による透明性の確保
- ・ 資源の有効利用
ロードマップの活用による安全研究の効率的実施
- ・ 開発と規制の共通認識の確立・効率的運用
産官学が中立的な学会で場で開発と規制の共通認識による効率的運用を図る。

規格基準など標準類の体系的開発と運用



産官学の役割分

① 産業界の役割

－安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究及び基盤整備

・PLM 規格基準化の推進
・人材育成・保全最適化・情報基盤整備

② 国・官界の役割

－安全規制行政判断に必要な研究実施
－知識・人材・施設・制度の基盤整備
－産学の安全に関わる研究と基盤整備の支援

・安全規制に係わる規制基準、規格体系に基づく学協会規格の endorse (主体者)

③ 学術界の役割

－安全基盤研究の検証、人材の育成

・規格の技術的基盤への「知」の貢献

④ 学協会の役割

－規格基準化とその高度化

・産官学の各ステークホルダーが参画した審議による規格基準類の策定
安全規制/規格体系の高度化
・コードエンジニアの育成

産学官の連携

産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

- ・ 安全規制に係わる規制規格体系に基づく民間規格の endorse
- ・ 各国の安全規制と民間規格の体系化調査
- ・ 各国の民間規格の調査
- ・ 国際標準 (ISO) /IAEA 基準等の調査

規格基準類の整備に係る技術マップ (1/2)

項目	技術課題	概要	実施/資金
基本方針の充実	安全規制/規格体系の高度化	安全設計思想から保安全管理まで矛盾のない統一性のとれた規体系及び民間規格体系の整備	学協会/産官
	高経年化対策に関する規格・基準の全体体系	各学協会で策定される規格と規制の関係および各規格間の関連の明確化	学協会/産官
制度(仕組み)の整備	規格・基準化整備体制の整備	産学官の研究成果を規格化し、これを国がエンドースするための推進体制整備	官/官
	技術開発成果の活用の仕組み作り	高経年化技術評価、保守管理等への迅速な試験研究成果反映の体系化、確性試験等成果の迅速な活用への枠組み構築	官/官
	学協会規格策定への支援の仕組み作り	学協会の規格策定事業への支援の仕組みを明確にし、成果の反映の仕組みとの連携を図る	学協会/産官
	リスクベース規制度構築	リスク重要度を加味した保守管理の重要度策定を行うべく「安全機能の重要度分類」と「リスク重要度による機器の分類」の関係から保守管理の重要度を決定する考え方の導入を検討	官/官
	高経年化プラントへ新技術適用のためのスキーム構築	新技術適用は、(G)確性試験、国の技術的妥当性審査等が重複した確認を行っているため、適用化のための新たなスキーム構築を狙いとする	官/官
規格基準化の推進	原子力発電所の高経緯年化対策(PLM)実施基準の改訂	日本原子力学会が策定した原子力発電所の高経年化対策技術評価実施基準の改訂	学協会/産
	PLM 実施基準の高度化	R&D 成果を反映しての見直しと新技術・情報を反映しての高度化	学協会/産

規格基準類の整備に係る技術マップ (2/2)

項目	技術課題	概要	実施/資金
規格基準化の推進	PLM 技術評価基準の策定	事業者が実施した高経年化対策技術評価等報告書の審査ガイドライン、標準審査要領等の制定	官/官
	維持基準の高度化	民間研究・安全研究の結果を反映して高経年化各事象の維持基準を策定	学協会/産官
	原子力発電所の定期安全レビュー実施手順(PSR)	PLM 実施基準および維持規格を適合した運用が為されているかの確認を行う項目・手順の規格化(定期安全レビュー標準の改訂)	学協会/産
	経年事象以外の事象での損傷検出のための監視基準	経年事象として対象として事象以外の事象を想定し、設備の重要度との関連で監視する基準を策定する	学協会/産
人材の確保・育成	高経年化対応教育・再教育プログラムの構築	原子力の安全・保全に関与する人材の確保・育成を積極的に進め、知識・技術力・判断能力等の維持・向上を推進する。	産/産
	規格・基準などコードエンジニアの育成	規格・基準全体をマネージメントする技術者育成プログラムを検討し、仕組みを提案する。	学協会/産官
	規格・基準体系をマネージメントする技術者・組織の育成	産官で統合した組織の構築と人材の育成	学協会/産官
保全最適化・情報基盤	リスクベース保全手法の確立	リスクを考慮し数量化した性能要求標準の整備	学協会/産官
	規格技術的背景・根拠のデータベースの整備	規格制定時にその根拠となった技術的思想・背景及び根拠を整備する。	産官/産官
	規格規制のプロセス管理データベースの整備	デュープロセスによる規格策定を示すファクト型のデータベースの構築	官/官
	規格改定のための情報基盤整理(再利用可能な形態への整備)	安全研究及び民間研究の研究成果を規格改正時に再利用可能な形態として整備する。(たとえば、き裂進展速度ではなく試験のデジタルデータを保管する。)	産官/産官
	国際標準との整合化	WTO/TBT 協定締結より国内で制定する規格・基準は原則として国際標準との整合化が要求されるため、規格策定時に調査を行う。	産官/産官

規格基準類の整備に係るロードマップ

時間軸	第I期					第II期									第III期																																			
	初期のプラントが40年を超えるまでの時期					40年を超えて50年を迎えるまでの時期									50年を超えて60年を迎えるまでの時期																																			
	技術基盤の整備 (制度面及び技術面の整備)					技術の高度化 (運転実績、実機材サンプリングによる最新知見の整備)									次世代原子力発電所の開発・建設 (大型炉設計、原子炉容器取替、最新廃炉技術の開発実証)																																			
年度	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37	H38	H39	H40	H41
マイルストーン	↑ 国による高経年化対策ガイドラインなどの公表					↑ 運転開始後40年を迎える時期									↑ 運転開始後50年目を迎える時期 ↑ 運転開始後60年目を迎える時期 ↑ 2030年以降原子力発電所の大規模な代替建設需要増大																																			
課題	平成17年8月に国が発表した技術基準の整備					1. 実機損傷予測を可能とする評価手法の開発 2. 実機損傷と試験結果の比較評価手法の開発 3. 損傷機構に基づく高信頼性試験によるデータ整備									1. 次世代中大型原子力発電プラントの設計及び機器開発 2. 原子炉容器取替技術等の開発、実証試験 3. 新たな原子力政策に必要な技術情報の整備																																			
経年化対応技術開発及び予測しない事象への対応技術開発	基盤の整備 ・制度面の整備 ・技術面の整備					運用による高度化 ・知見の反映 ・適用による検証									将来展望 ・物理的寿命 ・経済的寿命 ・エネルギー戦略																																			
規格・標準の開発整備	規制から民間規格までシームレスな規制・規格体系の開発整備 経年劣化対策技術評価審査ガイドライン・審査要領等の策定																																																	
	・包括的経年化管理 ・ガイドラインの整備 (予期しない事象への対応ガイドラインを含む。)					包括的経年化管理・監視ガイドラインの高度化									国際標準の経年化管理・監視ガイドラインの策定及び履行																																			
	PLM/PSR標準並びに維持規格等の発行		安全規制と整合連携した規格基準体系への移行			・高度化された包括的PSR/PLM標準の開発 ・性能化された要求ベース標準+代表的な仕様ベース標準 ・個別損傷モードに対応した規格の高度化 ・新たな知見の反映 ・予防、計測、監視、評価、補修など																																												
	-		国・学協会で制定されたリスク関係規格・ガイドラインに基づきPSR・PLM標準等を改訂・策定			・リスクを考慮し数量化した性能要求標準の整備(リスクベース規制の導入) ・保全体系の整備(規格・基準・ガイドラインの整備)									・既設経年化プラントの特徴を踏まえた標準の知見の次世代原子力発電プラントの設計に反映するためのデータの整備と新たな設計規格基準の開発																																			
	計画・検査・評価・監視等の規格化		劣化・損傷モードを想定した監視規格の整備			想定されていない劣化・損傷事象への対応としての監視基準									プラントを包括した総合的な監視基準の整備																																			
情報基盤整備	安全規制/標準体系の高度化(安全設計思想から保全管理まで矛盾のない統一性のとれた規制体系及び民間規格体系の整備)																																																	
人材の育成	・規格・基準の裏付けと策定過程を管理する統合データベースの構築 ・規格規制のプロセス管理データベースの構築					・容易に検索が可能なデータベースの構築 ・再利用・高度な評価が可能となる評価手法の整備 ・国内官民協同データベース運用 ・国際的なデータベース構築への指向 ・国際標準との整合性									・国際データベース構築と管理 ・開発と連携したデータベースの仕組みの構築																																			
人材の育成	・コードエンジニアの仕組み構築 ・規格基準策定の統一した体制の整備					・規格・基準全体をマネージメントする技術者の育成									・規格・基準体系をマネージメントする技術者・組織の育成 ・産官で統合した組織の構築と人材の育成																																			

7. 保全高度化の推進に係る導入シナリオ

保全の高度化の必要性について

- ・運転開始後 30 年を越える高経年化プラントが増加している。
- ・保全の高度化に向けて、合理的な保全手法の導入に係る検討(保全最適化の推進)と、それを支える人材面からの対策(人材育成・確保)の両面が重要である。
- ・「保全プログラム」の導入計画や「原子力立国計画」の策定などの国による重要施策が進められており、趣旨に合致した産官学一体の対応が必要。

現状分析

保全最適化の推進

産業界によりトラブル情報(ニューシア)が公開されているが、保全や高経年化という観点で体系的に整理された内容とはなっていない。また、「保全プログラム」の導入が進められているが、リスク情報やオンライン監視の活用等の課題が残されている。さらには、諸外国の規制を日本に則した制度へ改善し導入するためのスキームの構築も不十分な状況にある。

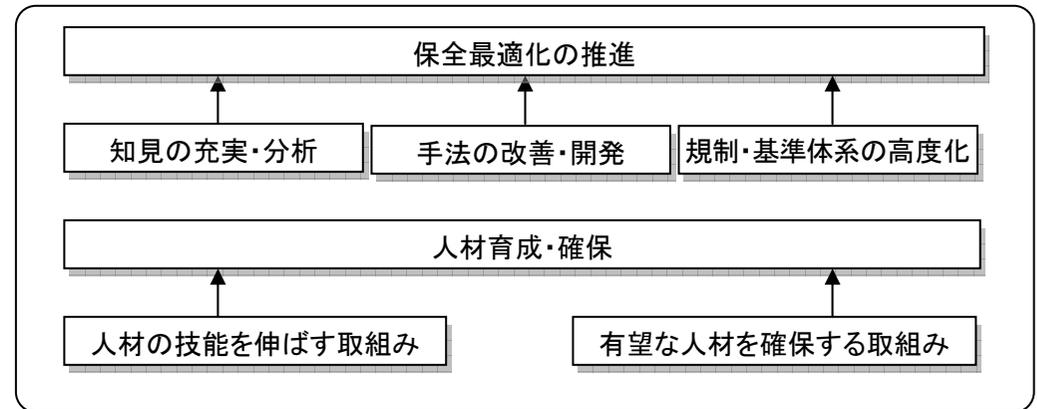
人材育成・確保

現場技能者の質的な維持・向上や技能の継承や、原子力専門教育・研究の希薄化といった育成上の課題、および就職を希望する学生の減少により原子力分野での人材確保に問題が生じること等が指摘されている。これに対して、経済産業省主導による「原子力立国計画」が進められている。

戦略的シナリオ

保全最適化の推進に関しては、知見、手法、規制の各々の面からの充実を図っていく。

人材育成・確保に関しては、人材の技能を維持・向上する観点と人材を確保していく観点の両面からの取組みを推進していく。



産官学の役割分

① 産業界の役割

－安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究及び基盤整備

- ・保守管理データベースの充実
- ・リスク情報活用・検査技術高度化
- ・規制制度への現場ニーズ反映
- ・技能継承、技能者の育成
- ・原子力のPA、イメージ向上

② 国・官界の役割

－安全規制行政判断に必要な研究実施
 －知識・人材・施設・制度の基盤整備
 －産学の安全に関わる研究と基盤整備の支援

- ・国際的な情報網の整備
- ・安全に係る規格・規制の策定・エドース
- ・安全規制の確立と整備
- ・人材の厚みの確保・発展

③ 学術界の役割

－安全基盤研究の検証、人材の育成

- ・学術的手法による保全最適化
- ・技術開発の助勢
- ・学生・研究者の育成

④ 学協会の役割

－規格基準化とその高度化

- ・規格基準の整備

産学官の連携

産学官による協調・共同研究が必要な研究課題

- ・安全性向上のための保全規制体系の構築
- ・産官学間の人材交流

保全高度化の推進に係る技術マップ

項目	技術課題	概要	役割分担 (実施/資金)
保全最適化の推進	知見の充実・分析	規制関連情報、電力共通技術基盤、規格・指針策定過程を始めとする保全最適化に必要なデータベースに関し、その分析結果に基づいた反映計画の検討と実施を行っていく。	産官学/産官
	手法の改善・開発	<ul style="list-style-type: none"> ・保全学の構築と応用 ・リスク情報活用のための調査、手法開発、適用化研究、方策の決定 ・プラント安全性能指標の確立 ・発生確率や過去の点検実績に基づく保全の最適化 ・構造信頼性評価手法の確立（確率論的破壊力学解析手法の研究） ・IT技術等を応用したプラント監視技術（ヘルスマonitoring技術） ・線量低減工法の最適化 ・プロアクティブ経年劣化事象の評価 ・RVの照射量低減対策 	産学/産
	規制・基準体系の高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・新技術・規格適用のための国の関与体制の明確化（研究成果の規格化、確性試験、技術的妥当性審査等に係る国の関与・エンドースのための体制整備・明確化） ・機器重要度・リスク情報を考慮した保全規制・基準体系の構築 	産官/産官
人材育成・確保	人材の技能を伸ばす取組み	<ul style="list-style-type: none"> ・現場技能者（点検・保修に従事）ネットワークの構築（情報共有の仕組みの構築） ・現場技能者の育成・技能伝承（資格や技量認定制度の充実、地域の取組みの支援、教育研究活動の支援） ・原子力技術者（開発・設計・製造・保全に従事）のマネジメント、エンジニアリング、設計力等の能力向上 ・大学における原子力教育の再構築 ・産官学の人事交流制度の構築 <p>（原子力立国計画に関連する範囲については、官主導で実施していく）</p>	産官学/産官学
	有望な人材を確保する取組み	<ul style="list-style-type: none"> ・低年齢層からの原子力教育（エネルギー政策上の位置づけや放射線等の正確な知識の教育） ・原子力PA、原子力に対する職場イメージの向上、原子力に対する正確な理解の促進 	学/官学 産/産
	原子力立国計画の推進	<p>人材の厚みの確保・発展 原子力人材育成プログラム</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力教育支援プログラム ・原子力の基盤技術分野強化プログラム ・チャレンジ原子力体感プログラム ・原子力研究促進プログラム ・原子力研究基盤強化プログラム ・原子力教授人材充実プログラム 	官学/官

保全高度化の推進に係るロードマップ

		第Ⅰ期（初期原子カプラントの40年まで）					第Ⅱ期（同50年まで）					第Ⅲ期（同60年まで）	
年度		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015～2019	2020～2029
保全最適化の推進	知見の充実・分析	規制関連情報の分析・反映計画の検討											
		データベースの活用、現場への反映					電力共通技術基盤の分析・反映計画の検討						
							規格・指針策定過程のデータベース分析・反映計画の検討						
	手法の改善・開発	学術的視点からの保全の最適化	保全学の構築と応用										
		リスク情報活用方策の策定	リスク情報活用のための調査、手法開発、適用化研究、方策の決定										
		プラント安全性能指標の確立	→ プラント安全性能指標(PC/PI)					→ IT技術を駆使したPI遠隔監視・常時監視手法の検討					
		新しい検査手法に関する技術開発・高度化	→ リスクベース保全手法の確立										
			→ 発生確率や過去の実績に基づく保全の最適化										
		→ IT技術等を応用したプラント監視技術（ヘルスマonitoring技術）											
		検査手法・破壊力学の確立	構造信頼性評価手法の確立（高経年化軽水炉機器）										
被曝量低減のための技術開発・実機適用に対する取り組み	線量低減工法の最適化												
海外や他産業での手法との比較検討	プロアクティブ経年劣化事象の評価												
	RVの照射量低減対策												
規制・基準体系の高度化	事業者が開発した技術を速やかに適用できるスキームの構築	新技術・規格適用のための国の関与体制の明確化											
	機器重要度・リスク情報を考慮した「保全プログラム」の導入	機器重要度・リスク情報を活用した保全規制・基準体系の構築											
人材育成・確保	人材の技能を伸ばす取組み	現場技能者の育成	現場技術者ネットワークの構築										
		原子力技術者の育成	現場の技能者の育成・技能伝承（資格や技量認定制度の充実他）										
	原子力技術者の育成	原子力技術者のマネジメント等の能力向上											
	学生の育成	大学における原子力教育の再構築											
	人事交流	産学官の人事交流制度の構築											
	有望な人材を確保する取組み	原子力に対する正確な知識の付与	低年齢層からの原子力教育										
	原子力に対する職場イメージの向上	原子力PA、原子力に対する職場イメージの向上、原子力に対する正確な理解の促進											
	原子力立国計画の推進	人材の厚みの確保・発展、原子力人材育成プログラム											

高経年化対応技術戦略マップ2007

8. まとめ

- 平成17年3月に取り纏められた原子力学会の第一次ロードマップを基本としたローリングを行い、「高経年化技術戦略マップ2007」を策定した。
- 高経年化対策技術戦略マップの対象は、運転年数が長期にわたるプラントの安全性を確保するために必要となる技術的基盤である。これは、プラントを長期間使用している実績が諸外国を含め多くない状況の中で、最新の技術的知見や運転経験などをもとにプラントの監視や予防保全などの対策を適切に講ずるため必要となる基盤である。
- 「保全プログラム」に基づく保安活動に対する新検査制度の導入、『原子力立国計画』に基づく次世代原子力発電所の建設などの原子力情勢の変化を捉えた長期的な“技術戦略マップ”として、「技術情報基盤の整備」「安全基盤研究の推進」「規格基準類の整備」及び「保全高度化の推進」の4大項目別に導入シナリオ、技術マップ及びロードマップを策定した。
- 導入シナリオに従い、技術マップ（技術的課題）別に産業界、学術界、学協会、及び官・官界の実施すべき役割分担（実施主体／資金出所）の明確化を図った。毎年ローリング（見直し）を実施する予定である。

高経年化対応技術戦略マップ2007

9. 提言

1. 今後は、ローリングの過程で具体的な役割を決め、導入シナリオに沿った高経年化対応技術戦略マップ2007の実現に向けた積極的かつ具体的な活動が望まれる。
2. 学協会規格を策定し、技術評価を受けるという一連のプロセスにおいて、原子力安全委員会及び原子力安全・保安院をはじめとする産官学が、必要な課題を共通に認識し協力して解決していくことが重要である。
さらに、国は技術戦略マップ2007に応じ技術評価のための積極的な準備が望まれる。
3. これらの活動を円滑に推進していくためには、知識基盤・施設基盤の整備や人材の育成を産官学が協力して進めることが重要であり、国のより一層の関与が望まれる。
4. ここで報告された技術戦略マップは、産官学の専門家が検討しているものであり、専門家や国民の間で広く共有されるとともに、国がこれらを尊重することが望まれる。