

第5回 リスク情報活用に関する意見交換会

確率論的破壊力学を用いた 原子炉圧力容器 溶接継手試験程度の変更について

2026年4月23日

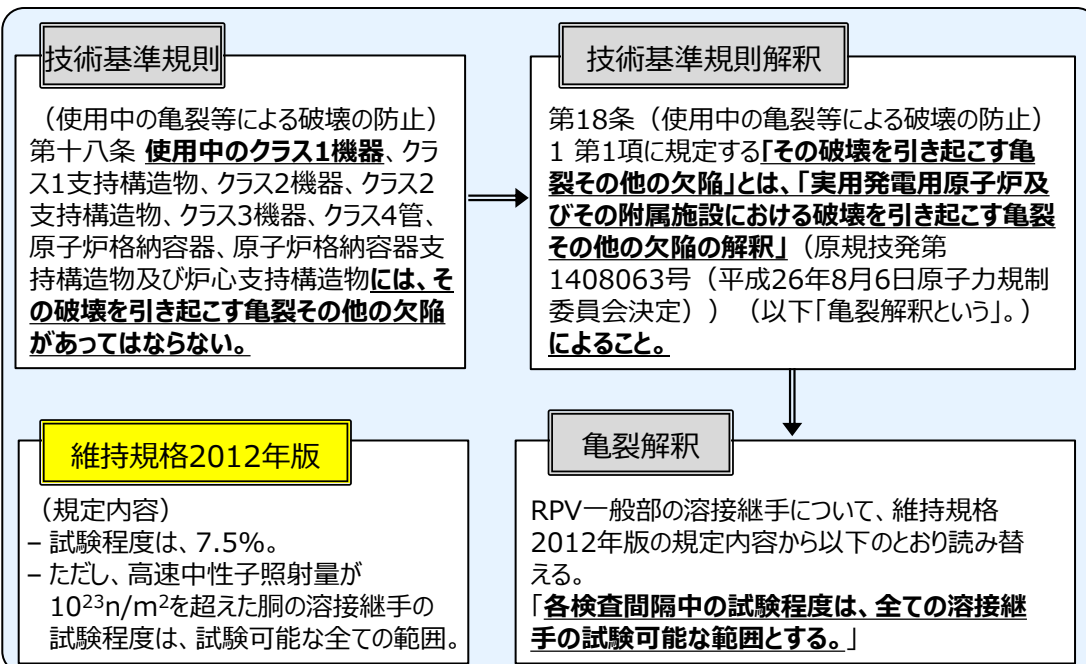
一般社団法人 原子力エネルギー協議会
(ATENA : Atomic Energy Association)

1. はじめに
2. 国内のRPV溶接継手検査の現状
3. RPVの試験程度に係る米国の動向
4. 確率論的破壊力学（PFM）評価内容
5. 試験程度変更の実機適用までの進め方
6. まとめ
7. 参考資料

1. はじめに

- ✓ 供用期間中の原子炉圧力容器（RPV）一般部の溶接継手の非破壊検査試験程度に関する規制体系は下図のとおり。試験可能な範囲の全ての溶接継手を対象に検査の実施が要求されている。
- ✓ これは、維持規格2012年版の技術評価の結果、亀裂解釈が改正され下表のとおり諸外国と同様の試験程度に引き上げられたことによる（7.5%/10年→100%/10年）。
- ✓ これに従い、事業者は、試験程度（100%/10年）で実施していくこととしているが、中性子照射量や部位によって破損リスクは異なるため、確率論的破壊力学（PFM）評価を活用し、リスクの大きさに応じた試験程度へ変更することを目指している。また、試験程度を変更することにより、検査員の被ばく量低減に資することも期待される。
- ✓ 以降、2029年度までの試験程度変更を目指すBWRのRPV一般部の試験程度を対象とし、PFMを活用した試験程度変更の実機適用までの進め方について意見交換させていただきたい。

RPV溶接継手試験程度の規制体系



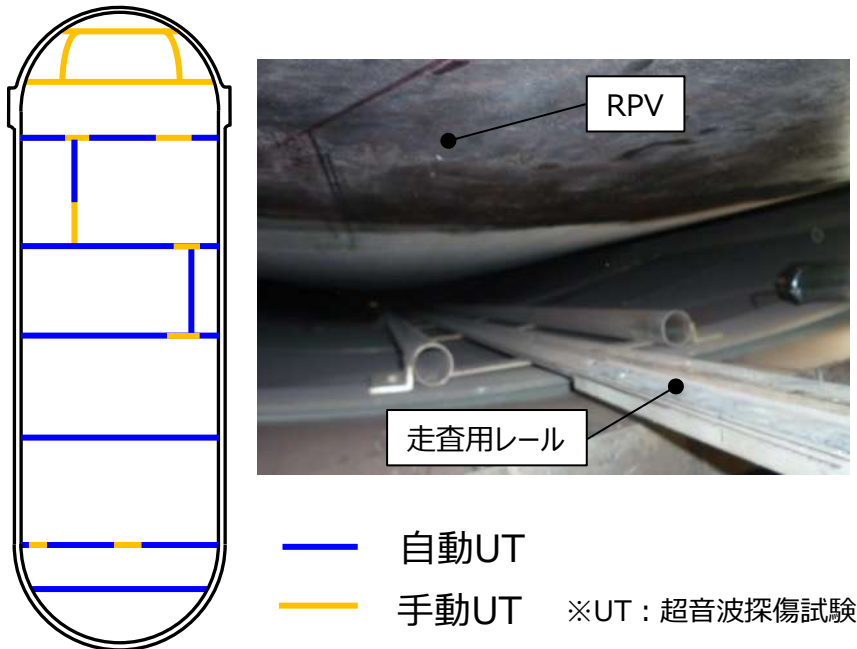
維持規格2012年版技術評価前後の試験程度

試験部位	試験程度 (%/10年)	
	技術 評価前	技術 評価後
胴の周／長手継手（炉心外周域） （高速中性子量 10^{23}n/m^2 未満）	7.5※1	100
胴の周／長手継手（炉心外周域） （高速中性子量 10^{23}n/m^2 以上）	100※2	100
胴の周／長手継手	7.5※1	100
鏡板の周／長手継手	7.5※1	100

- ※1 周継手については5%、長手継手については10%としてもよい。
 ※2 高速中性子照射量が 10^{23}n/m^2 を超えた胴の溶接継手は、試験可能な全ての範囲について試験を実施

2. 国内のRPV溶接継手検査の現状

- ✓ BWRにおけるRPV溶接継手の範囲及び検査における探傷作業の流れを示す。
- ✓ RPV溶接継手の検査は、原子炉格納容器（PCV）内での作業となり、**全ての溶接継手を検査する場合には、検査員の被ばく量が大きくなる。**
- ✓ **試験程度を100%とした場合の被ばく量を、7.5%検査時の実績被ばく量から試算すると、試験程度引き上げにより被ばく量は約10倍（約300mSv・人）に増加する。**
 - あるBWRプラントでの試算結果であり、プラント毎に異なる（溶接継手等の差異による）。



RPV溶接継手、探傷場所写真

No.	作業内容 (赤字：100%により被ばく量増加する作業)	作業場所
1	探傷器校正（探傷前）	PCV外
2	遮へい・保温材取り外し (探傷範囲ほぼ全て保温材取外し)	PCV内
3	足場設置（必要に応じ）、 ミガキ、範囲マーキング	
4	手動探傷	
5	表面清掃、足場撤去	
6	遮へい・保温材復旧	PCV外
7	探傷器校正（探傷後）	

作業の流れ（手動探傷の例）

3. RPVの試験程度に係る米国の動向

- ✓ 米国では原子炉圧力容器をはじめとする原子力設備の供用期間中検査（ISI）の試験程度については、10CFR50.55a（米国連邦規則）により、基本的にASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI（以下、ASME Sec. XI）の要求に従うこととされており、**ASME Sec. XIではRPV溶接継手の体積試験については、試験可能な範囲に対し100%/10年の検査が要求**されている。
- ✓ **ASME Sec. XIの要求に従った試験程度から変更する場合には、設置者はリリーフリクエストを提出する**必要がある（10CFR50.55aに規定）。
- ✓ リリーフリクエストにより、**検査間隔の延長（PWR）や試験部位（範囲）の削減（BWR）**等が行われ、米国原子力規制委員会（NRC）による安全評価報告書の発行を経て、RPVの試験程度は、**実質的に「100%/10年以下」**となっている。
- ✓ 米国のRPV溶接継手の体積試験要求におけるリリーフリクエストに基づく実質的な試験程度と実施状況^[1]を以下に示す。

項目	PWR	BWR
リリーフリクエストに基づく試験程度	検査間隔の延長 (10年→20年)	試験部位（範囲）の削減 (長手継手100%、周継手 0%)
申請数／運転プラント	65/69	34/34

- ✓ BWRにおけるリリーフリクエストの技術根拠として、**PFM評価により、RPVの試験程度を従来から削減（炉心領域を含む周方向溶接継手の試験程度を0%）とした場合であっても、炉心の損傷頻度を与える影響が無視しうる程度に小さい**ことを確認し、BWRVIP-05として纏めている。

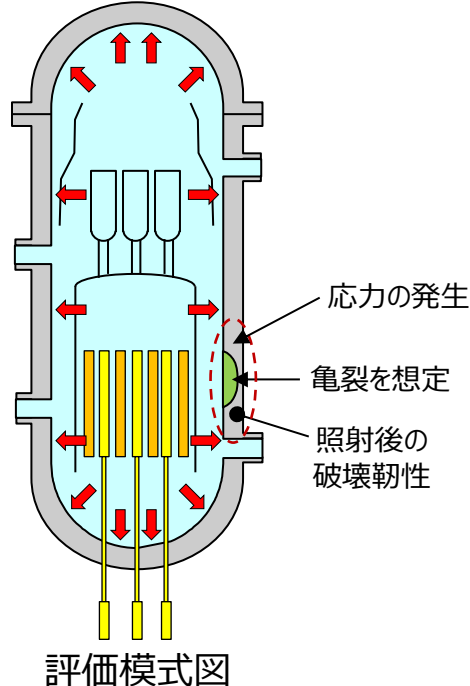
➡ **以上の米国の動向を踏まえ、国内においてもPFMを活用し、試験程度を変更したい。**

4. 確率論的破壊力学 (PFM) 評価内容 (1/2)

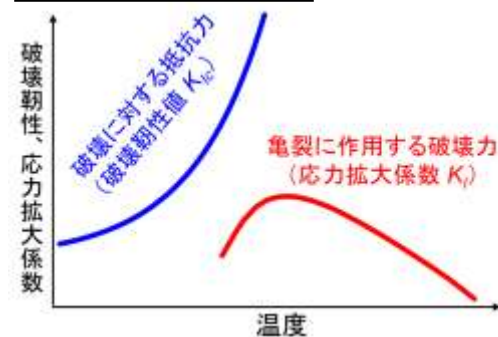
【PFMとは】

- ✓ 決定論的破壊力学では、亀裂や破壊靱性等を保守的に設定して破壊するかどうかを評価する。
- ✓ PFMでは、破壊現象に影響する種々のパラメータに確率的な分布を与えて、機器等が破壊する頻度を求め、破損頻度の許容値と比較して評価する。
- ✓ PFMは、機器の合理的な許容基準を設定するだけでなく、破損の頻度の増減を評価することにより、保全計画の有効性や規格・基準改定時等における評価手法の妥当性の判断材料として活用することが期待される。

原子炉压力容器
(耐圧・漏えい試験等)



決定論的破壊力学



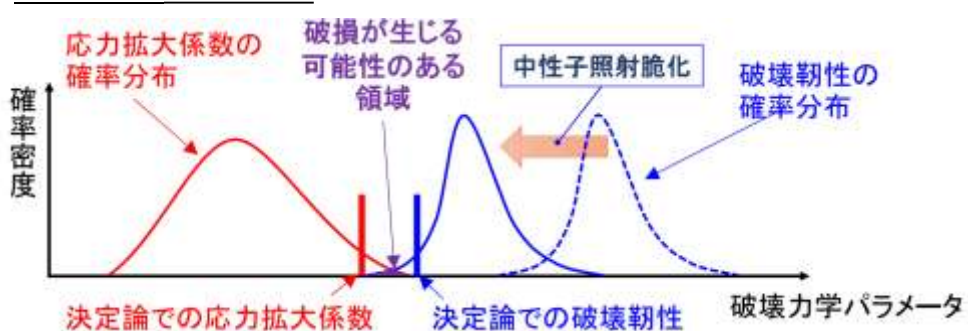
脆性破壊を防止するための条件

破壊靱性

>

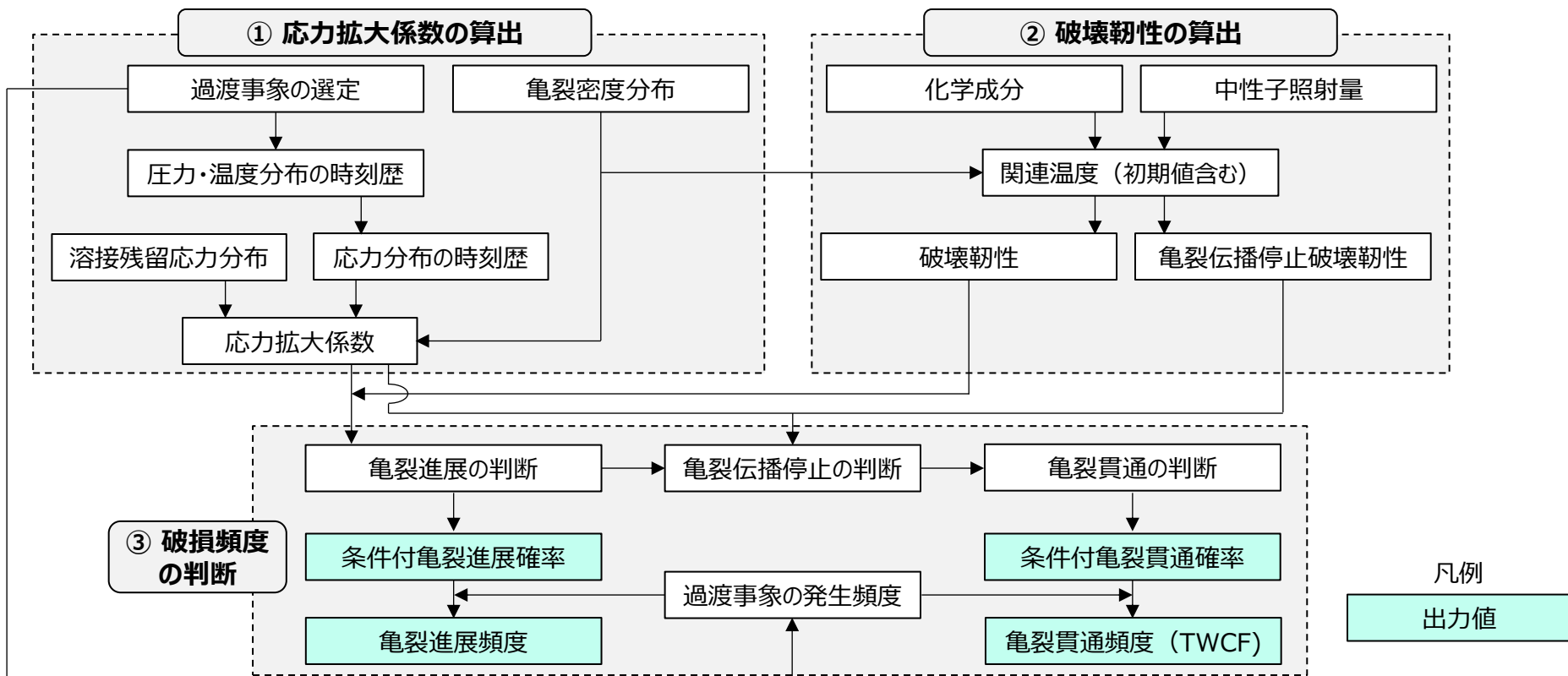
応力拡大係数

確率論的破壊力学



【評価フロー】

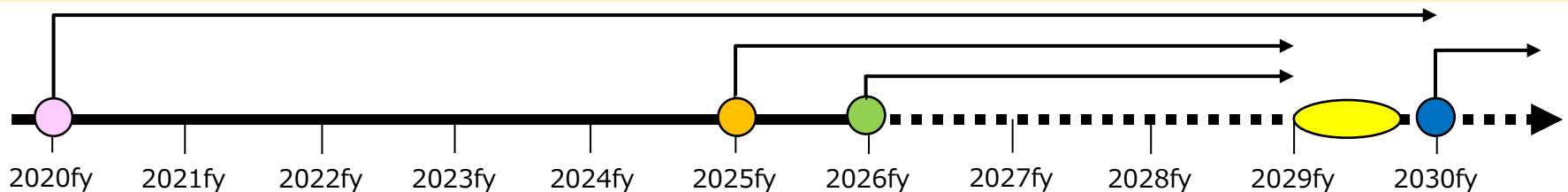
✓ PFM評価では、以下のフローに基づき、**RPVの亀裂貫通頻度 (TWCF)** を算出する。



PFM評価フロー

事業者対応方針

- 【2020年度～2029年度末】亀裂解釈の要求に基づき、事業者は試験可能な範囲の溶接継手すべての試験を実施する。“破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥”の有無を確認することはもとより、検査時の検査員被ばくの総量 (mSv・人) を記録する。
- 【2025年度～2028年度末】PFM評価によって、RPVの試験程度を従来から変更した場合でも、RPVのTWCFの変化量 (Δ TWCF) が無視しうる程度に小さいこと及びその結果として検査員の被ばく量が低減することを示す技術根拠資料 (解析コードのV&V (検証・妥当性確認) を含む) をATENAが作成する。
- 【2030年度～】試験可能な範囲の溶接継手すべての検査を一度実施し、問題ないことを確認した事業者においては、2030年度以降の検査において、試験程度を変更していく。



ご相談事項

- 【2026年度～2028年度末】ATENAが作成する技術根拠資料の内容を作成段階から確認いただきたい。RIDM意見交換会や研究意見交換会合のスコープを拡大、あるいは新しい意見交換の枠組みの構築等により、対応いただきたい。
- 【2029年度】意見交換を通じて、2029年度までに技術根拠資料の内容について合意形成を図りたい。以降の検査では、試験程度を変更させても“技術基準規則に照らして十分な保安水準の確保が達成”できるものとする。また、亀裂解釈には、試験程度を変更可能とする旨を明記いただきたい。

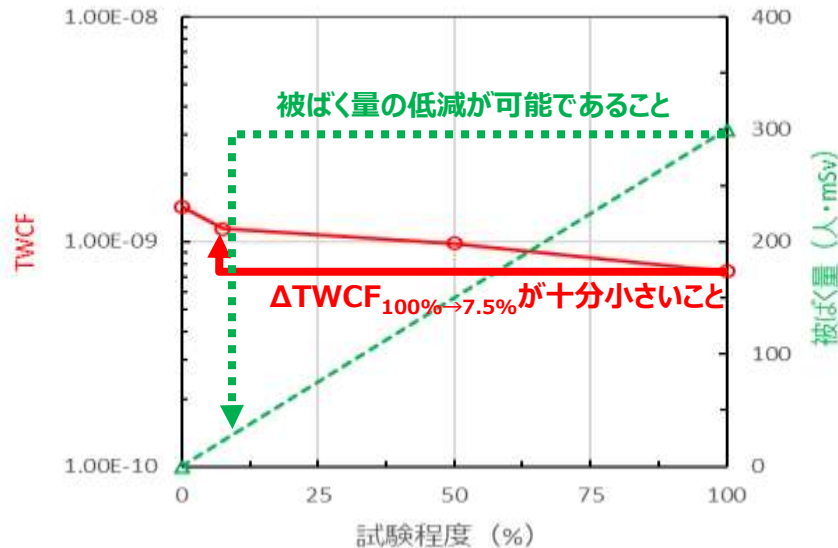
- ✓ ATENAが作成する技術根拠資料の位置付け (想定)
 - PFM評価によって、RPVの試験程度を従来から変更した場合でも、RPVの $\Delta TWCF$ が無視しうる程度に小さいこと及びその結果として作業員の被ばく量が低減することを示すもの。
 - 上記に係る活動を事業者共通の考えの下で的確に運用するためのプログラムを規定。

- ✓ 主な内容・構成 (想定)
 - 技術基準・亀裂解釈における要求事項の基本的考え方 (RPV溶接継手に要求される試験程度や、十分な保安水準の確保が達成できる技術根拠があれば技術基準規則へ適合すると判断されること等)
 - 十分な保安水準の確保が達成できることを示す技術根拠
 - PFM概要と関連文献等
 - 判定基準とPFM評価結果 (V&Vを含めたPFM評価内容の詳細は参考資料として添付する構成を想定)
 - 試験程度変更に伴う被ばく量の低減効果

5. 試験程度変更の実機適用までの進め方 (3/3)

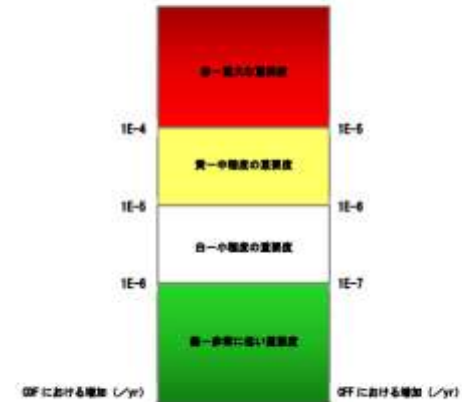
技術根拠の概要

- ✓ 技術根拠として、PFM評価により、試験程度をパラメータとした感度解析を実施し、例えば、試験程度を100%から7.5%とした場合に、 $\Delta TWCF_{100\% \rightarrow 7.5\%}$ が十分小さいことを踏まえて、試験程度変更が妥当であること及びそれに伴って被ばく量の低減が可能であることを示す。
- ✓ $\Delta TWCF$ が小さいことを示す指標として、ROPの重要度評価に用いられている判定基準の $\Delta CDF \leq 10^{-6}$ を参考とする。
- ✓ 技術根拠に基づき、**合理的な試験程度を設定し、当該試験程度が十分な保安水準を確保できることを目指している。**
 - 合理的な試験程度の例：米国同様に長手継手100%、周継手0%（長手継手の方がTWCFが大きいいため）



評価結果 (イメージ図)

原子力安全に係る重要度評価に関するガイド
別紙1 検査指標事項の定量的重要度の図示 (実用発電炉原子炉施設)



注記：左側の数値領域及び重要度評価ガイド図例裏面へ適用されるものではない。

検査指摘事項の定量的重要度の図示^[1]

6. まとめ

- ✓ 事業者は、PFM評価を活用し、リスクの大きさに応じた試験程度へ変更することを目指している。また、試験程度を変更することにより、検査員の被ばく量低減に資することも期待される。
- ✓ 試験程度を変更しても、RPVの $\Delta TWCF$ が無視しうる程度に小さいこと及びその結果として検査員の被ばく量が低減することを示す技術根拠資料をATENAが作成する。
- ✓ 技術根拠資料の作成段階から、規制当局との意見交換を継続的に実施して、合意形成を図ることとしたい。

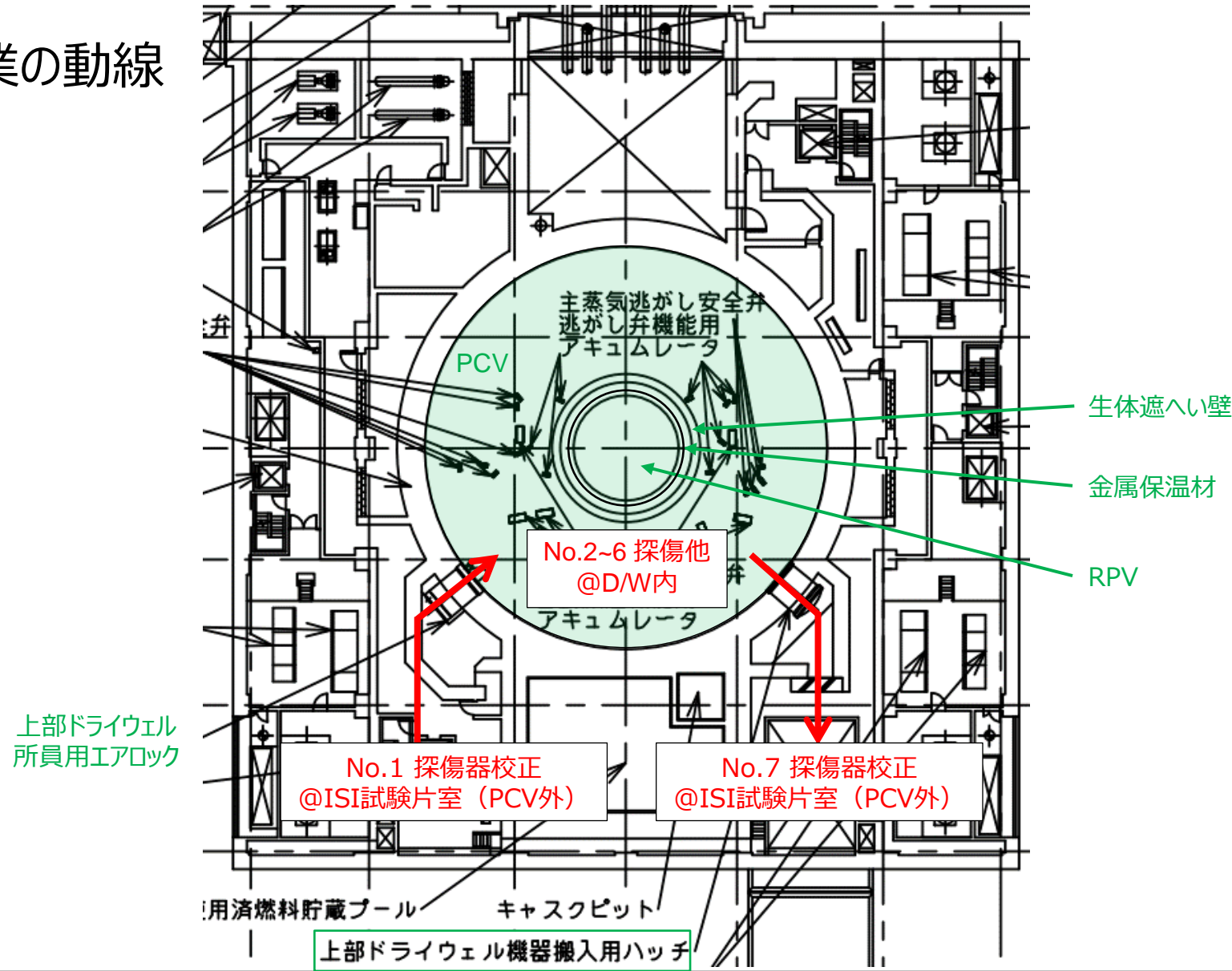
7. 參考資料

ISIの作業の流れ（附帯作業含む）

No.	自動探傷	手動探傷	作業場所
1	探傷器校正（探傷前）		PCV外のISI試験片室 （低線量エリア）
2	遮へい・保温材取り外し （自動：装置取付部周辺のみ保温材取外し、 手動：探傷範囲ほぼ全て保温材取外し）		PCV内※
3	装置取付	足場設置（必要に応じ）、 ミガキ、範囲マーキング	
4	自動探傷試験 （ケーブル介錯作業あり）	手動探傷試験	
5	装置取り外し	表面清掃、足場撤去	
6	遮へい・保温材復旧		
7	探傷器校正（探傷後）		

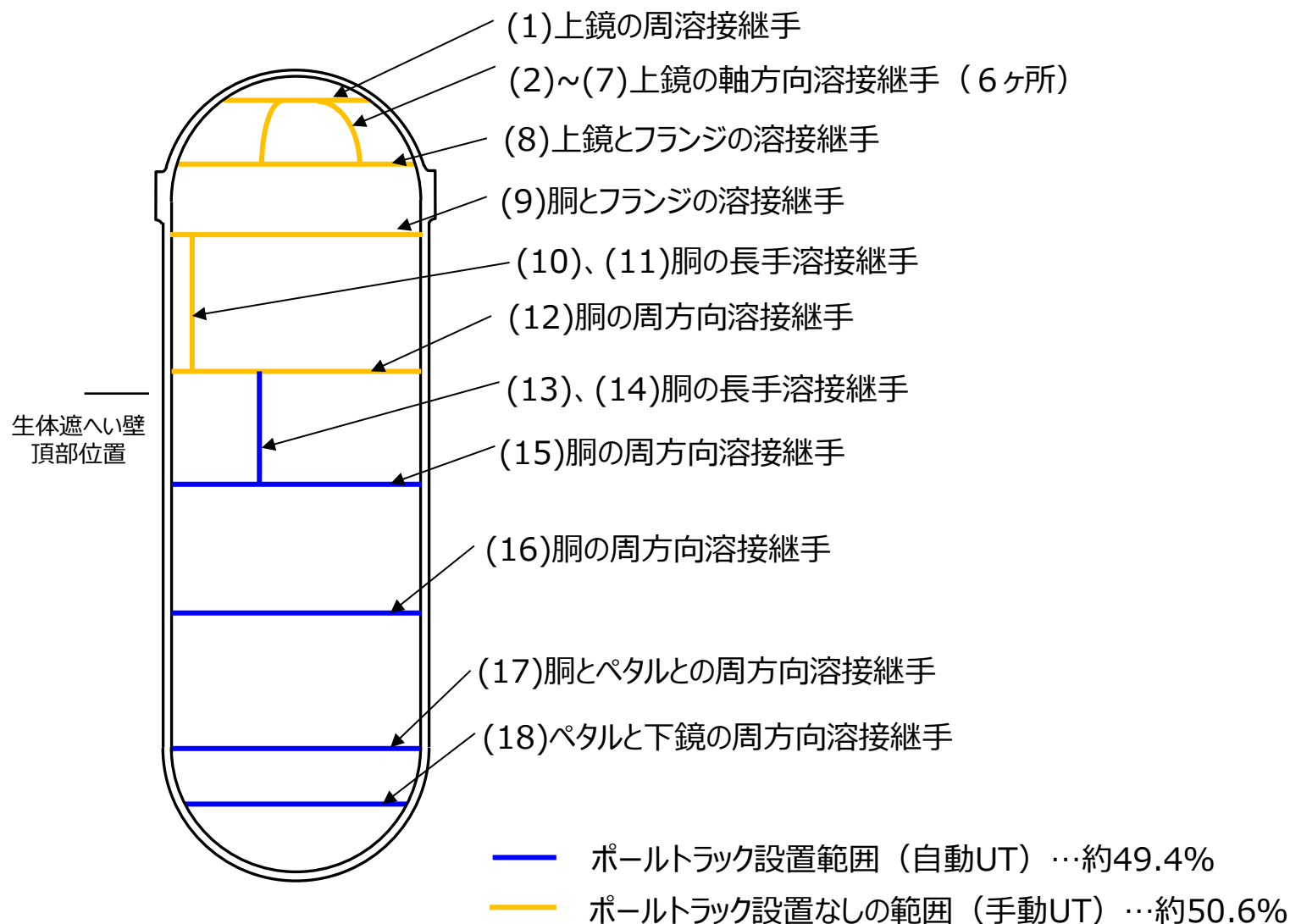
※ RPV上蓋はオペレーティングフロアに移動後に実施

作業の動線



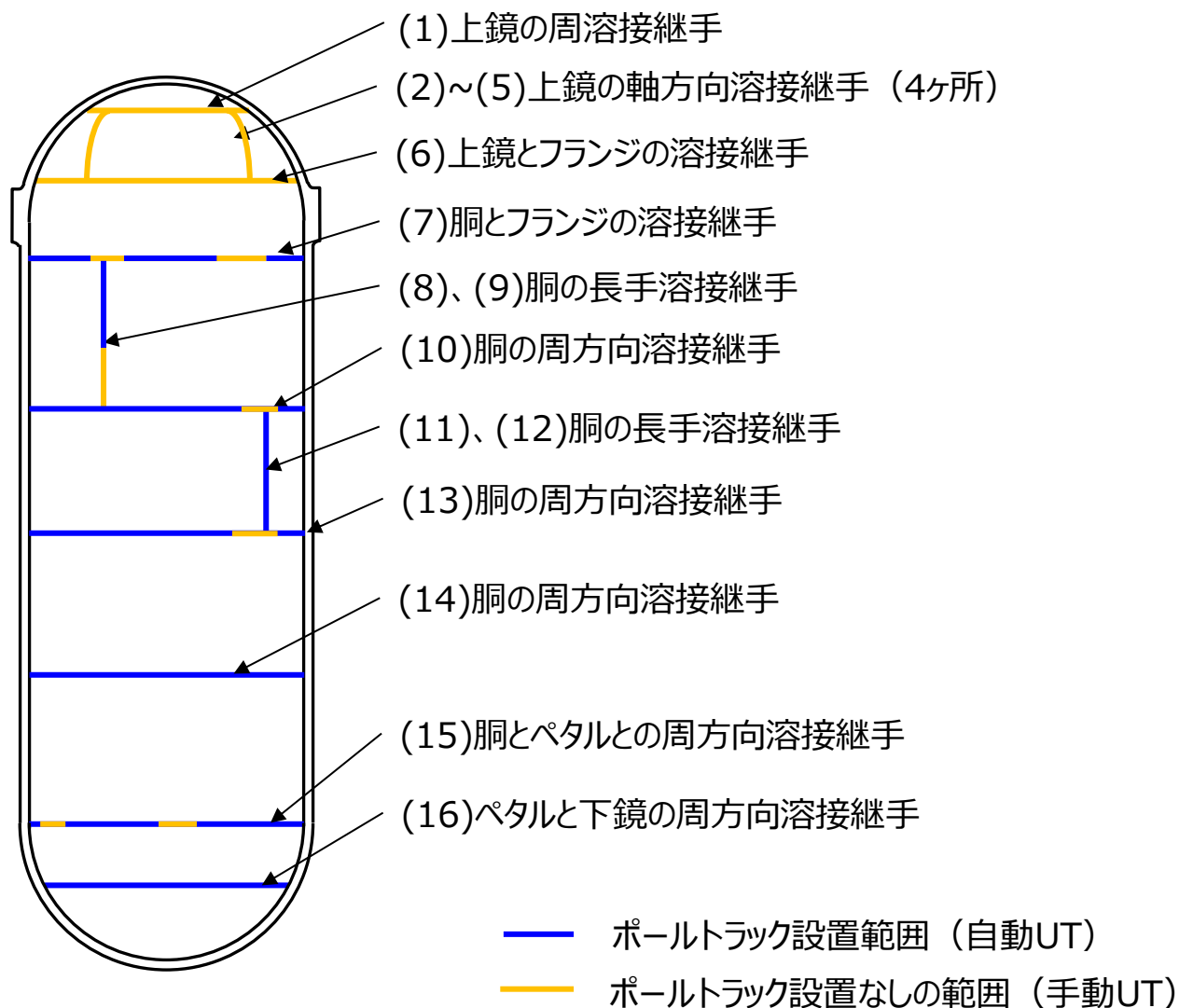
7. 参考資料（供用期間中のRPV一般部の溶接継手の非破壊検査）

BWR5（柏崎刈羽原子力発電所5号機）の検査範囲



7. 参考資料（供用期間中のRPV一般部の溶接継手の非破壊検査）

BWR5（女川原子力発電所2号機）の検査範囲



- 被ばく量が増加する作業は、下表の赤字部分である。

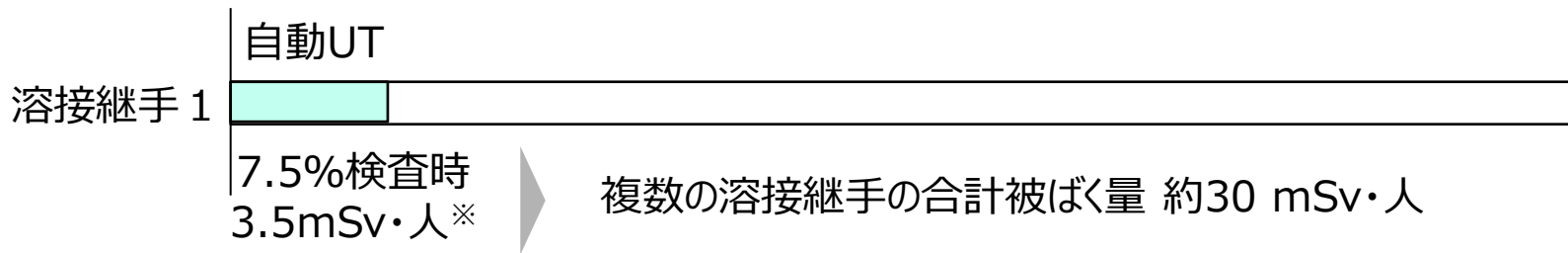
作業の流れ

No.	自動探傷	手動探傷	作業場所
1	探傷器校正（探傷前）		PCV外のISI試験片室
2	遮へい・保温材取り外し (装置取り付け部周辺に加え、必要に応じてケーブル状態確認のため探傷範囲上断続的に保温材取外し)	遮へい・保温材取り外し (探傷範囲ほぼ全て保温材取外し)	PCV内※
3	装置取付	足場設置（必要に応じて）、ミガキ、範囲マーキング	
4	自動探傷 (ケーブル介錯作業あり)	手動探傷	
5	装置取り外し	表面清掃、足場撤去	
6	遮へい・保温材復旧	遮へい・保温材復旧	
7	探傷器校正（探傷後）		PCV外のISI試験片室

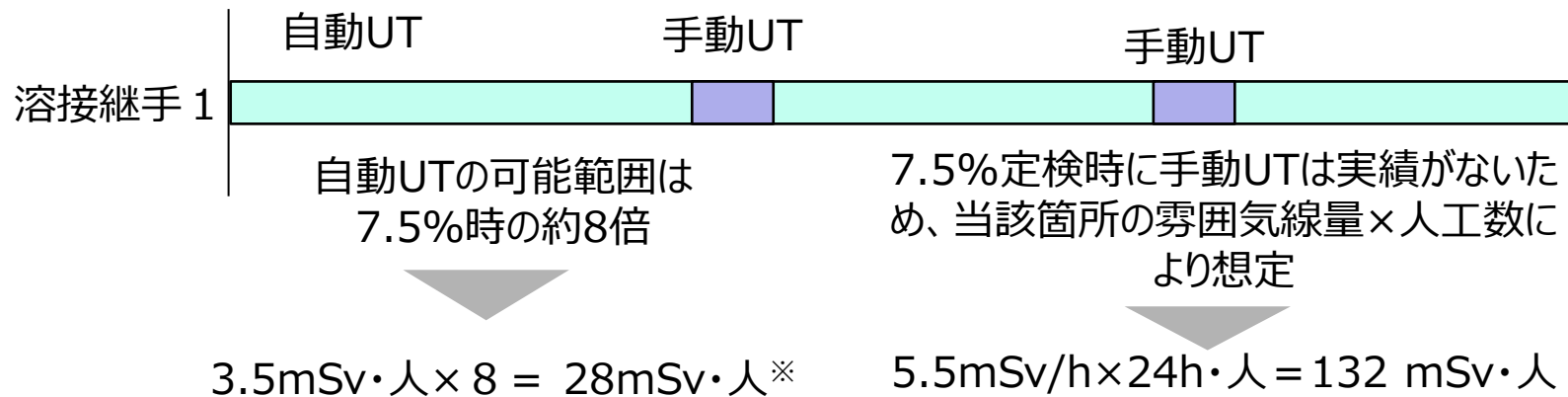
○被ばく量の試算方法の例

7.5%UT実績

※：自動UTはレール継ぎ目で装置の取り外し、取り付けが必要であり、UT範囲が拡大することで、その作業に伴い被ばくが発生する。



100%UTでの想定



他の溶接継手についても同様に算出し、100%検査時の被ばく量（約300mSv）を想定した。

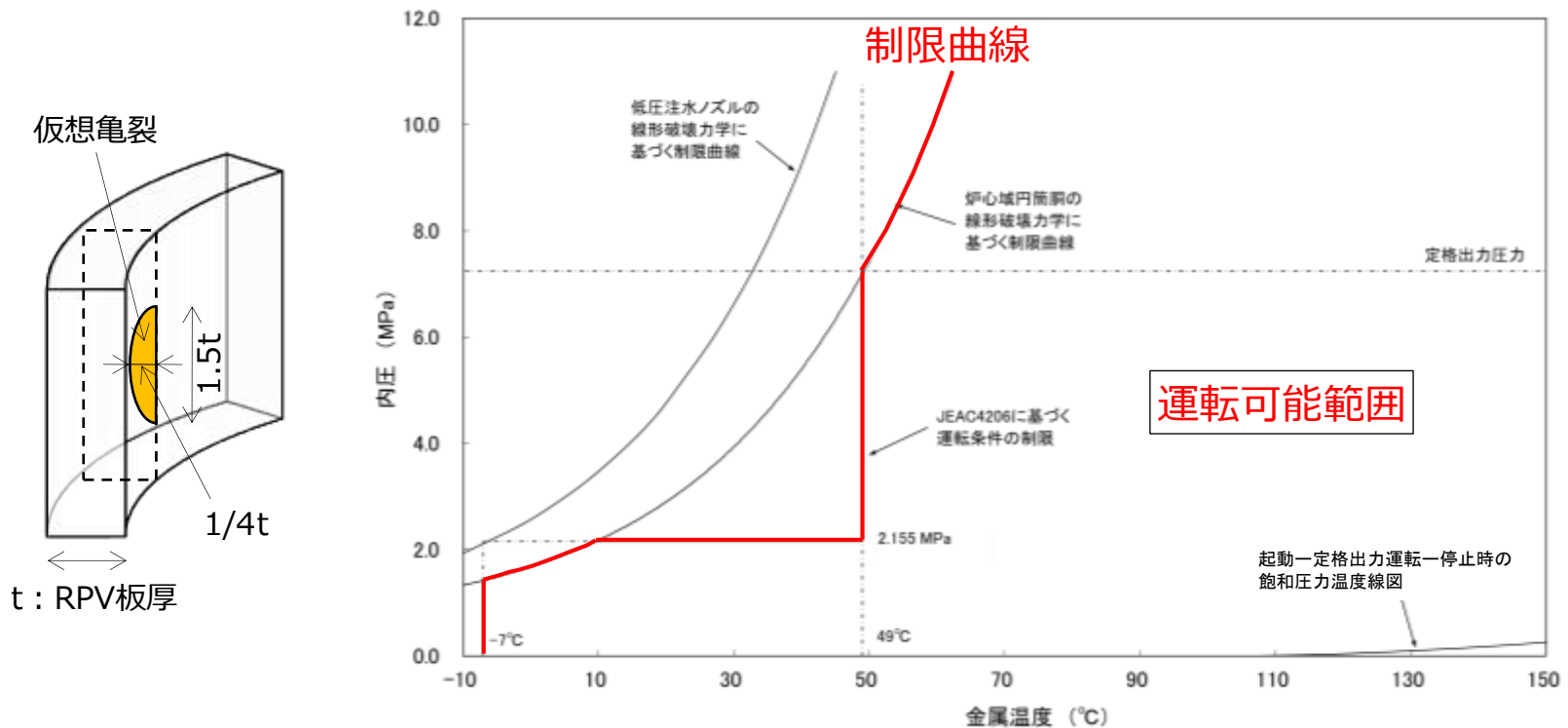
国内へのPFM適用に向けた課題^[1]

分類	課題名
国内プラント 向け評価条件	化学成分の標準偏差
	溶接残留応力（熱応力フリー温度含む）
	初期亀裂密度分布
	破壊靱性値（ K_{IC} 、 K_{Ia} ）
解析ソフトウェアの品質	解析ソフトウェアのV&V（検証・妥当性確認）の実施方法
解析結果の感度	感度解析（Sensitivity analysis）
	潜在的未知数（Sensitivity studies）
試験程度変更の手続き	手続き方法
試験程度変更の判断基準	判断基準

[1] 第5回安全研究及び研究開発に関する原子力事業者との技術的な意見交換個別テーマ会合「経年劣化」資料1、2025年10月16日開催、[リンク](#)の内容を一部編集

7. 参考資料（RPV破損防止に対する対応）

- 運転中や耐圧・漏えい試験時等の際に設備・運用面の観点からRPV破損防止のための対応を実施している。
- その一つとして、米国同様、RPVの非延性破壊防止に対する健全性評価として決定論的破壊力学評価を実施し、RPVの圧力・温度を制限して運転している。
 - 胴部の場合、深さ0.25t、長さ1.5t（tはRPV板厚）の大きな亀裂を仮想し評価。



RPVの圧力・温度制限曲線の例