

2014年9月10(水) 13:00-14:30

原子力学会2014秋の大会 新型炉部会セッション

もんじゅ研究計画について ～プラント技術成立性の確認と安全技術体系の構築～



写真提供: JAEA

東京大学大学院 工学系研究科原子力国際専攻 笠原直人

ご説明内容

- 「もんじゅ」で行う研究開発の分類
- プラント技術成立性の確認
- 安全技術体系の構築
- 研究開発段階発電用原子炉活用について（報告者意見）

謝辞

本報告は、文部科学省 原子力科学技術委員会 もんじゅ研究計画作業部会報告書 および 日本原子力研究開発機構からの同部会提出資料を引用して作成しました。ここに謝意を表します。

「もんじゅ」で行う研究開発の分類

「もんじゅ」で研究開発可能な技術	
炉心・燃料技術	高次化Pu/Am含有組成燃料で構成された炉心の設計技術 実用規模燃料等の設計技術等
機器・システム設計技術	ループ型炉プラント系統設計技術・評価技術 ループ型炉の大型機器設計技術・評価技術等
ナトリウム取扱技術	原子炉容器・1次主配管用ISI技術 蒸気発生器伝熱管用ISI技術等
プラント運転・保守技術	トラブル等から得られる知見の集積による運転技術・保守技術の向上 燃料取扱系機器の保守管理技術
安全機能確認・評価技術	大規模系統での自然循環除熱設計技術・評価技術 シビアアクシデント発生防止・影響緩和に係る設計対応技術等



以下の観点で技術をそれぞれ再整理(A1~C3)



高速増殖炉開発における技術の重要度

- A. 高速増殖炉開発において鍵となる技術
- B. 高速増殖炉開発において重要又は補強となる技術
- C. 高速増殖炉の成果の取りまとめには入らない技術

「もんじゅ」を利用することの優先度

- 1. 「もんじゅ」でなければ開発できない技術
- 2. 「もんじゅ」で開発することが合理的な技術
- 3. 「もんじゅ」以外で開発することが可能な技術

■ 重要度・優先度の高い研究課題の選定

<p>A 1</p> <p>【炉心・燃料技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高次化 P u / A m 含有組成燃料で構成された炉心の設計技術・管理技術 <p>【機器・システム設計技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ループ型炉プラント系統設計技術・評価技術 ・ホットベッセル原子炉容器の設計・評価技術 ・計測設備設計技術の内、炉外核計装、F F D の設計技術 ・燃料取扱システム設計技術 <p>【ナトリウム取扱技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器 / 1 次主配管用 I S I 技術 <p>【プラント運転・保守技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1 次系配管・炉容器外配置 1 次系機器の保守管理技術 ・トラブル対応から得られる知見の集積による運転技術・保守技術の向上 <p>【安全機能確認・評価技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「もんじゅ」のシビアアクシデント防止 / 緩和対策・評価技術 ・大規模系統での自然循環除熱設計技術・評価技術 ・安全保護系統（計装、保護動作）の設計技術・評価技術 ・ナトリウム-水反応防止 / 緩和設備の設計技術・評価技術 	<p>A 2</p> <p>【炉心・燃料技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実用規模燃料等の設計技術 ・廃棄物減容・有害度低減を目指した「もんじゅ」照射試験 <p>【機器・システム設計技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ループ型炉の大型機器設計技術・評価技術 ・計測設備設計技術の内、ナトリウム漏えい検出技術、水漏えい検出技術、タグガス式燃料破損位置検出技術 <p>【ナトリウム取扱技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・蒸気発生器伝熱管用 I S I 技術 ・ナトリウム管理技術（ナトリウム純度管理、放射化物（C P 挙動、トリチウム挙動）、ナトリウム蒸気管理、洗浄等） <p>【プラント運転・保守技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高速増殖炉発電プラントの運転管理技術 ・高速増殖炉の保守管理技術（2 次系機器等） ・燃料取扱系機器の保守管理技術 	<p>A 3</p> <p>【機器・システム設計技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高温構造設計・評価技術（コールド試験、常陽照射等） ・検出機器類の性能向上技術（コールド試験） <p>【プラント運転・保守技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・廃炉関連技術*（先行炉、海外炉） *：廃炉時に確認 <p>【安全機能確認・評価技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・シビアアクシデント発生防止・影響緩和に係る設計対応技術（コールド試験、I G R 炉） ・自然循環時の詳細温度分布等による解析技術（コールド試験）
<p>B 1</p> <p>【機器・システム設計技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水・蒸気系設備設計技術のうち、制御特性・過渡特性に関する設計技術・評価技術 	<p>B 2</p> <p>【機器・システム設計技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水・蒸気系設備設計技術の内、蒸気発生器等設計・評価技術 ・発電所補助システム設計技術（換気空調システム、メンテナンス時冷却システム） 	<p>B 3</p> <p>【機器・システム設計技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2 次系ポンプ設計・評価技術（コールド試験、海外炉） ・主循環ポンプ調速用 V V V F の設計技術（コールド試験） ・浸漬型純化系コールドトラップ設計技術（海外炉）
<p>C 1</p>	<p>C 2</p>	<p>C 3</p>

■ 重要度・優先度の高い課題に関して 以下を考慮して研究計画を策定

✓ 運転パターン

計画的に運転を継続するため、十全な保全期間が必要。また、故障の克服とその経験蓄積を行うことも重要な役割。従って、性能試験終了後の本格運転以降は、1サイクル(4か月)の運転に加え、8か月程度の点検を行う運転パターンを当面は想定する。

✓ 炉心構成

燃焼の進んでいない初装荷炉心で性能試験を行い、臨界特性及び出力特性を把握する。1/4ずつの燃料交換により5サイクルで平衡炉心(約5万MWd/t程度)に、その後13サイクル程度で高燃焼度炉心(約8万MWd/t程度)に移行する。

✓ 設備の信頼性(故障の発生段階)・経年特性

運転開始から5年程度の初期故障フェーズ、10年程度のランダム故障フェーズ、その後の経年的な故障フェーズを想定する。

次頁にA1課題に関する計画例を示す



【A1技術】 1. 炉心・燃料技術

1) 高次化Pu/Am含有組成燃料で構成された炉心の設計技術・管理技術	★ 初装荷炉心特性 (炉心設計手法検証)			★ 初期炉心特性 (約5万MWd/t取出平均) (炉心設計手法検証、炉心管理技術確立、炉心特性)		★ 平衡炉心特性 (約5万MWd/t取出平均) (炉心設計手法検証、炉心管理技術確立、炉心特性)			★ 高燃焼度炉心での確立(約8万MWd/t取出平均、16Cy)
-------------------------------------	----------------------------	--	--	---	--	---	--	--	------------------------------------

【A1技術】 2. 機器・システム設計技術

1) プラント系統の設計・評価技術	★ プラント初期性能 (ヒートバランス、100%出力連続運転等) プラント応答特性 (性能試験データ取得) しゃへい特性 (性能試験データ取得)	★ 動特性評価手法検証 しゃへい評価手法検証 (性能試験終了後2年程度)		★ プラント性能経年特性 (熱交換性能等) (経年的な特性確認を継続)					
2) ホットベッセル原子炉容器等の設計・評価技術	★ 機器の初期性能 (しゃへいプラグ、制御棒駆動機構等)			★ 機器性能の経年特性 (駆動特性等) (経年的な特性確認を継続)		★ 原子炉構造健全性(サーベイランス材取出 ^{※1}) (以降、12Cy、30Cyで実施)		★ 原子炉容器健全性 (ISI ^{※2} 、33%/10年)	★ CRD健全性(上部案内管交換 ^{※3})

【A1技術】 4. プラント運転・保守技術

1) トラブル対応から得られる知見の集積による運転・保守技術の向上				知見の集積					
2) 1次系機器に係る保守管理技術	★ 1次系機器に係る 第1保全サイクル用保全計画			★ 1次系機器に係る 保全計画の最適化				★ 1次系機器に係る 予防保全技術の開発	

【A1技術】 5. 安全機能確認・評価技術

1) 確率論的安全評価等によるシビアアクシデント評価技術の構築と安全性向上策の抽出	★ PSAIによる安全性向上策の抽出とその評価			★ (5年程度) 安全性の継続的改善のための総合的なリスク評価				★ (10年程度)
2) 「もんじゅ」の安全性に関する総合評価と活用	★ 安全基盤技術としてSAM策検討に活用							

プラント技術成立性の確認

■ 機器・システム設計技術

➤ 目的

実機データを用いて、システム設計技術や大型ナトリウム機器及びナトリウム炉特有計測設備等の機器設計技術を検証する。

定格運転を通じて、機器・システムの経年特性や健全性を実証する。

➤ 実施項目

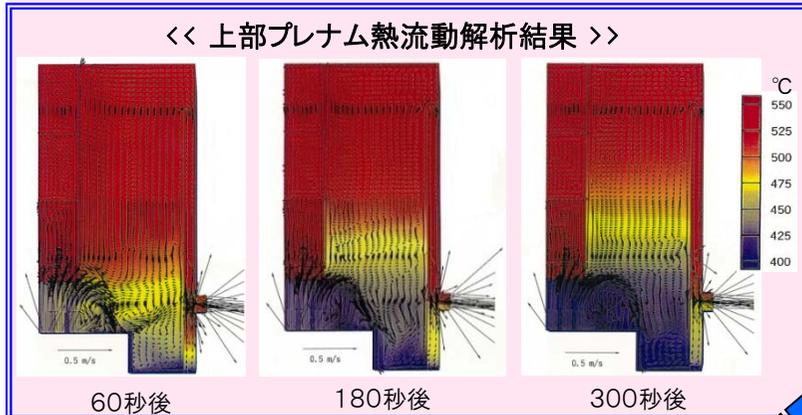
- プラント系統の設計・評価技術
- ホットベッセル原子炉容器等の設計評価技術
- 大型機器設計・評価技術
- ナトリウム炉特有の計測設備の設計・評価技術
- 燃料取扱システム設計技術
- 蒸気発生器等設計・評価技術
- 発電所補助システム設計技術



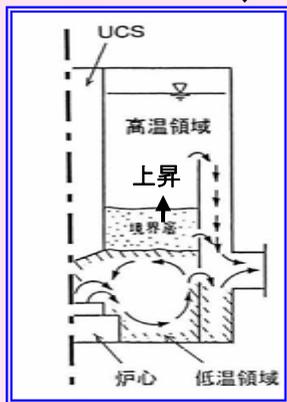
■ 機器・システム設計技術の例ープラント系統の設計・評価技術

性能試験データを用いてプラント運転制御特性を評価するコードを検証

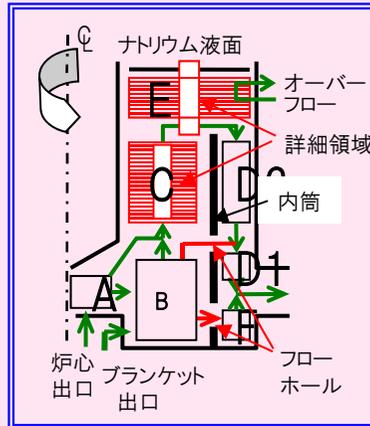
RVのFNM構築



流速分布・
温度分布
把握

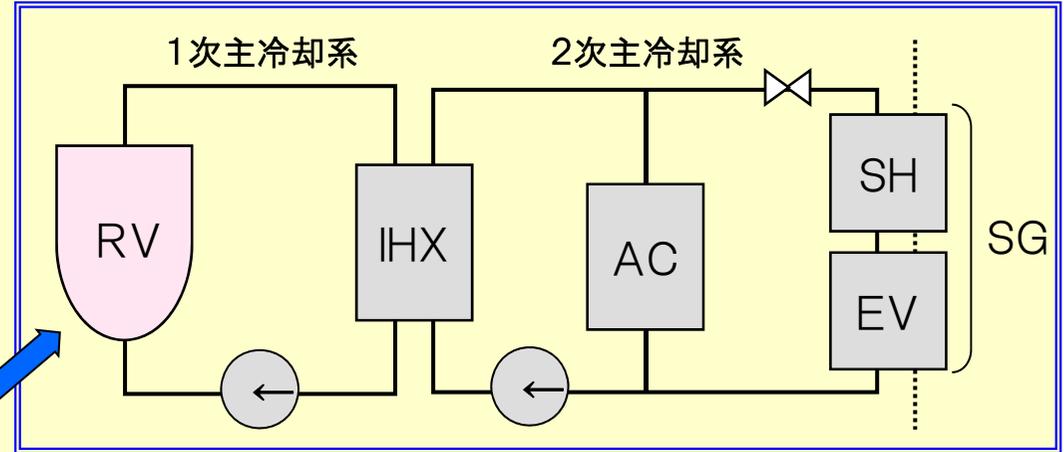


プラント全系動特性
解析モデルに組み込み



FNM
構築

プラント全系動特性解析モデル



主要機器のフローネットワークモデル(FNM)の構築

- 原子炉容器(RV)、中間熱交換器(IHX)、空気冷却器(AC)、蒸気発生器(SG)(蒸発器(EV)、過熱器(SH))について、詳細熱流動解析にもとづきFNMを構築(左にRVの例を示す)

FNMをつなぎ合わせたプラント全系動特性解析モデルを検証

- 構築したFNMを用いて、プラント全系の動特性解析を実施
- 「もんじゅ」性能試験により検証
(主要機器の出入口温度変化・流量化、フローコーストダウン特性データ、プラント運転制御特性データ)

■ ナトリウム取扱技術

➤ 目的

ループ型高速増殖炉特有の検査技術、世界に例のない蒸気発生器伝熱管の検査技術を開発する。

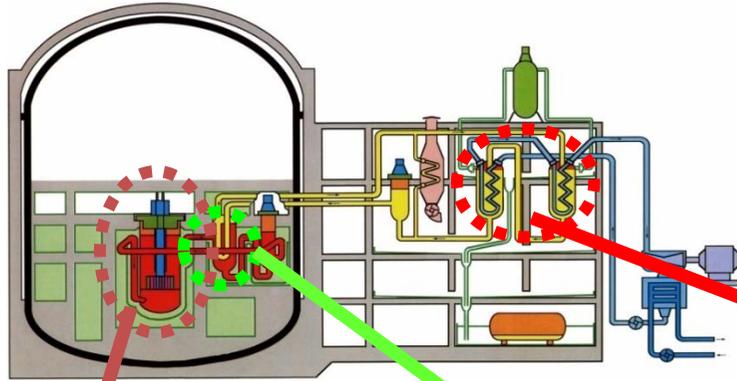
ナトリウム関連の管理データ(純度管理、放射化物挙動、ナトリウム蒸気挙動、ナトリウム洗浄等)を取得し、これらを用いてナトリウム管理技術を検証・確立する。

➤ 実施項目

- 供用期間中検査 (I S I) 技術
- ナトリウム管理技術

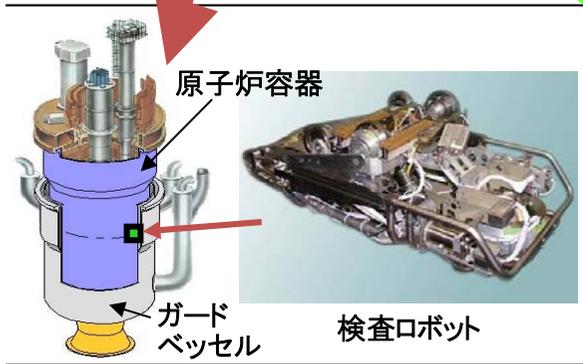
■ ナトリウム取扱技術の例ー供用期間中検査 (ISI) 技術

原子炉容器、1次主冷却系配管および蒸気発生器伝熱管の検査装置について、「もんじゅ」に適用し、高温・高放射線環境などを特徴とする高速炉機器のISI技術を開発する。



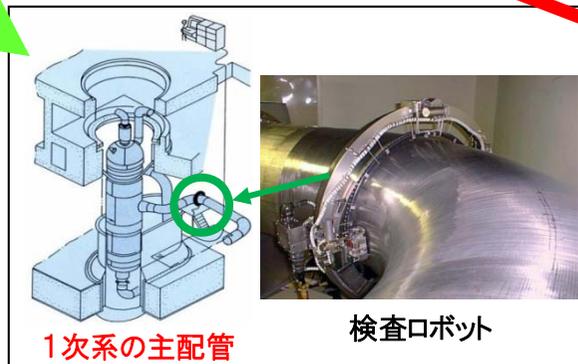
「もんじゅ」系統図

注) 蒸気発生器伝熱管ISI技術は、水系を有する大型ナトリウム施設でしか取得できず「もんじゅ」が最適。
原子炉容器や1次主配管用ISI技術の実証は、高放射線環境下である実機ループ型炉である「もんじゅ」でしか実施できない。



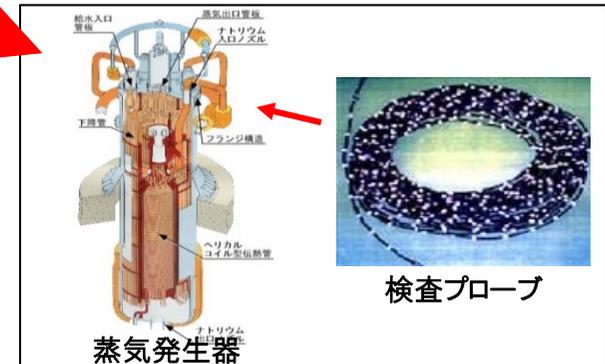
原子炉容器周り検査装置

- 特徴
- ・高温雰囲気(約200℃)
 - ・高放射線環境(最大10Sv/hr)
 - ・無軌道の狭隘(幅30cm)空間を自動走行など



1次主冷却系配管検査装置

- 特徴
- ・配管屈曲部(エルボ)の自動走行/検査
 - ・高放射線環境(配管への取付時間:目標5分以内)
 - ・カプラント(接触媒質)不要のタイヤ型超音波探触子など



蒸気発生器伝熱管検査装置

- 特徴
- ・強磁性体材料(蒸発器)
 - ・厚肉(3.5mm以上)
 - ・プローブの挿入が困難な長尺(約90m)かつ複雑形状の伝熱管 など

■ プラント運転・保守技術

➤ 目的

運転保守経験を通じ、運転手順等の運転管理技術、保全計画等の保守管理技術について成立性確認及び経験蓄積を行う。

トラブル対応から得られる知見を集積する。

➤ 実施項目

- 高速増殖炉発電プラントの保守管理技術
- 高速増殖炉発電プラントの運転管理技術
- トラブル対応から得られる知見の集積による運転・保守技術の向上

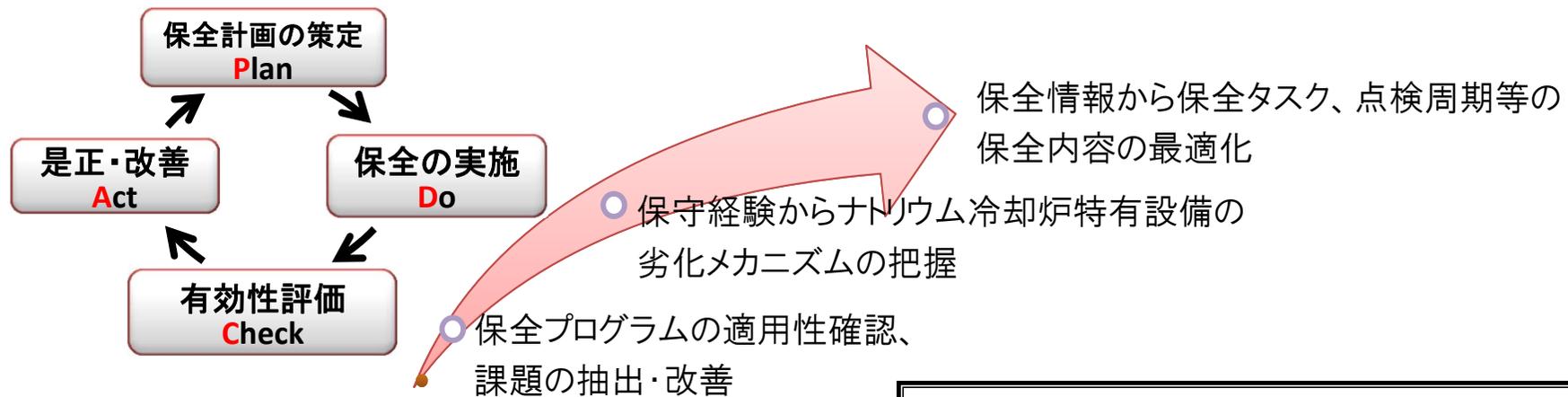
■ プラント運転・保守技術の例

一 高速増殖炉発電プラントの保守管理技術

運転・保守の経験を通じて成立性を確認し知見を蓄積する。また、初期故障とその後のランダム故障の経験・克服に基づき、高速炉の特徴を考慮した保全技術を確立する。

1. 高速炉用保全計画の開発

・高速炉の特徴を踏まえた保全技術の確立



2. 保守管理システムの構築・整備

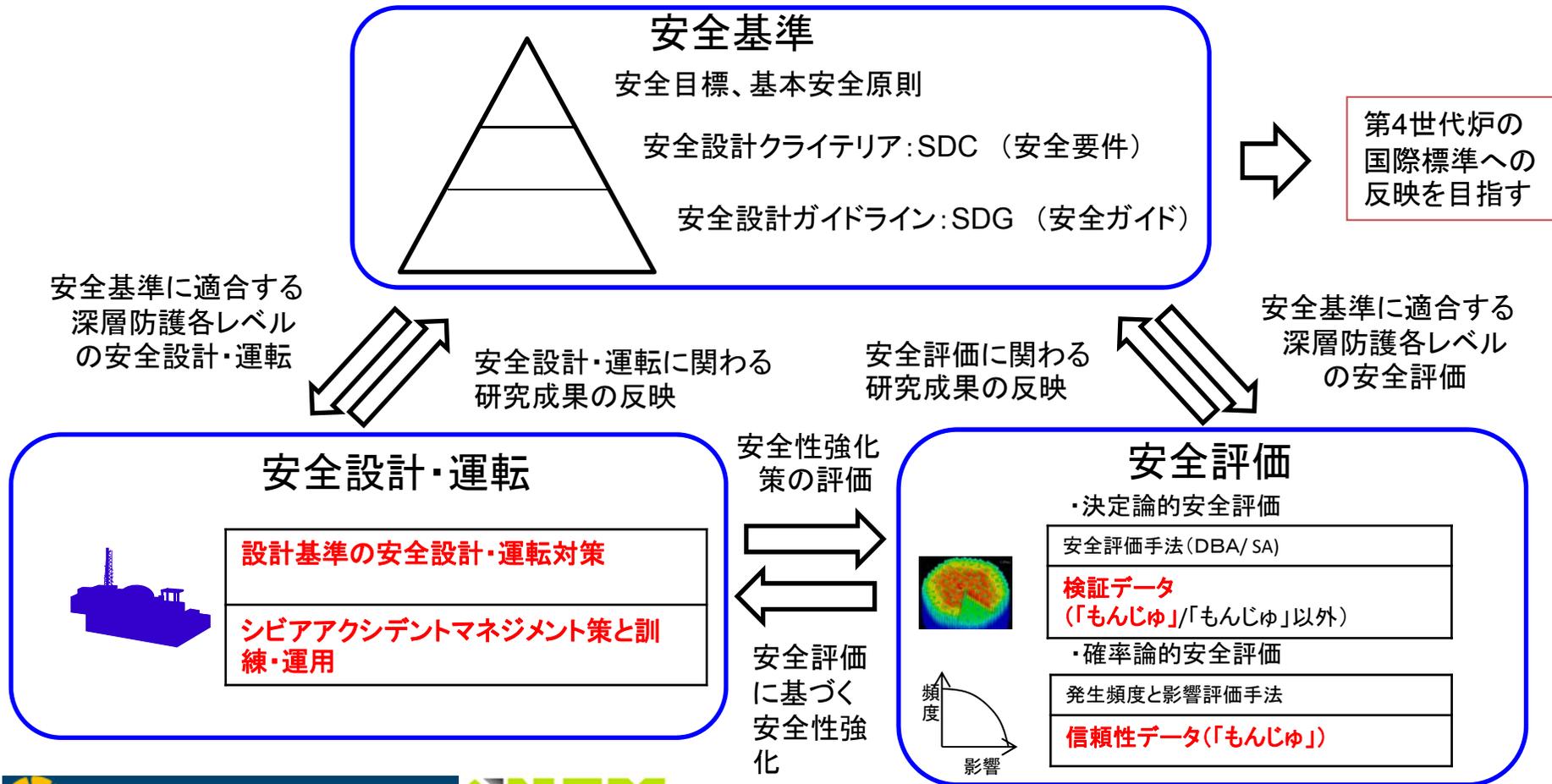
- ・点検、補修等の保全情報を蓄積・管理
- ・機器外形図等の設計情報、保修票等の故障情報、積算運転時間等の保全に有用な情報を集約

高速炉の特徴：

- ・低圧であり、急速な破断を生じにくい
- ・材料との共存性がよく、腐食を生じにくい
- ・熱応力によるクリープ・クリープ疲労が支配的な劣化
- ・バウンダリ開放時の空気混入防止が必要
- ・ナトリウム冷却炉に特有の機器が存在
(ナトリウム漏えいに対する設備、ポンプ、計装品など)

安全技術体系の構築

研究開発成果は、「安全基準」、「安全設計・運転」、「安全評価」の3つの観点から集約し、互いに連携させつつ安全技術としての体系化を図る。「もんじゅ」は主として赤字部の研究開発に活用される。



■ 「もんじゅ」で実施する項目とそれ以外で実施する項目を整理

福島原子力発電所事故の経験を踏まえた高速炉の安全技術体系を構築するため、「もんじゅ」でシビアアクシデント(SA)対策に関する実践的な研究開発を実施する

- 主として「もんじゅ」で実施する項目
 - SA評価技術の構築と安全性向上策の抽出
 - SAM(シビアアクシデントマネジメント)策の充実とその実証的な確認や訓練・運用

- 主として「もんじゅ」以外で実施する項目
 - 損傷炉心燃料等の安定的な冷却手段の多様化のための研究開発
 - 炉心損傷時の再臨界の防止と事象の炉容器内終息を図るための研究開発
 - 高速炉の安全基準に資する研究開発

■ SA評価技術の構築と安全性向上策の抽出

➤ 目的

確率論的安全評価(PSA)を踏まえたSAに対する安全性強化の研究を、「もんじゅ」という実機プラントへの適用を通じて実施する。

高速増殖炉のSAの評価技術を構築する。

自然循環による崩壊熱除去を実機スケールで実証する

➤ 実施項目

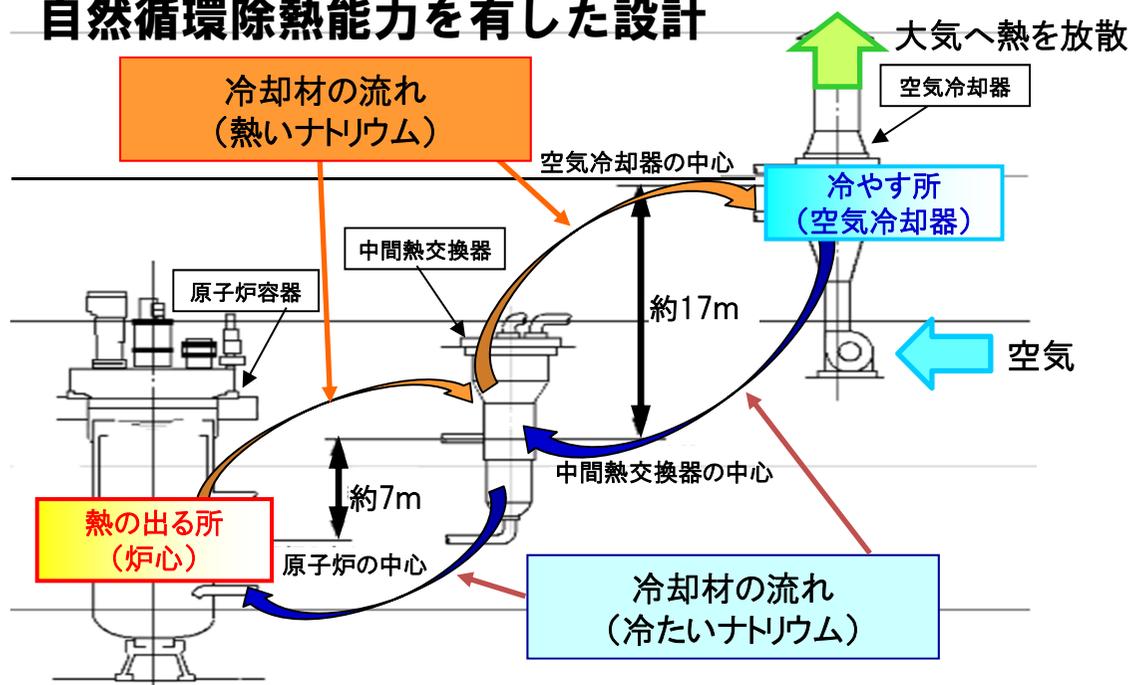
- P S A 評価技術の構築と安全性向上策の抽出
- 「もんじゅ」の安全性に関する総合評価
- 自然循環除熱システムの設計技術・評価技術
- 設計基準ベースの安全設計・評価技術

■ SA評価技術の構築と安全性向上策の抽出の例

一 自然循環除熱システムの設計技術・評価技術

「もんじゅ」性能試験において、自然循環試験を実施する。
 全交流電源喪失時の炉心冷却手段として、自然循環によっても炉心崩壊熱除去ができ、安全にプラントが停止できることを実証する。

自然循環除熱能力を有した設計



【高速炉の自然循環による炉心冷却】

- ① 空気冷却器を最終除熱源とすることから高所配置が可能で、伝熱中心差を大きくとることが可能
- ② 動的機器が少ないので、信頼性が高い
- ③ 冷却材が単相なので、安定して循環し易い

【ループ型高速増殖炉の自然循環除熱性能を実証】

- 試験で確認する内容
- ① 自然循環冷却能力
 自然循環により炉心崩壊熱が除去できることの確認
 - ② 自然循環時運転特性
 自然循環時のプラントの動特性の把握

炉心と中間熱交換器、中間熱交換器と空気冷却器、それぞれの伝熱中心高さの差を適切に取ることで、十分な自然循環除熱能力を有する。

■ SAM策の充実とその実証的な確認や訓練・運用

➤ 目的

幅広い外部事象を含むSA事象シーケンスに対して、高速炉の特徴を踏まえたSAM(シビアアクシデントマネジメント)策を検討し、安全性の向上を図る。

「もんじゅ」実機に対して、設計基準を超える外部事象等の幅広い事象に関する安全機能の維持・回復、影響緩和等の安全性向上策を整備する。

前述のSA評価技術により有効性を評価するとともに、訓練・運用を通じて改良を行う。

➤ 実施項目

- SAM策の整備

■ SAM策の充実とその実証的な確認や訓練・運用—SAM策の整備

＜SAM策の充実＞

福島原子力電所事故教訓の反映(SAM関係)

- 事象想定不足(外部事象)
- 対策・手段不足(代替策)
- 訓練不足(支援体制)

海外知見の反映(SAM関係)

- IAEA(DiD第4層)の安全要件
- IAEA SAMガイド(NS-G-2.15)
- 米国の外部事象に対する安全要件



＜従来構築してきたSAM策＞

シナリオに準じた対策・操作
(事象シーケンス依存)



想定範囲の拡大



＜フレキシブルな対策・操作＞

外的事象等によるシナリオレスな機能喪失想定に対して使用可能なものをすべて活用し頑健性を向上

- 可搬型電源接続
- 水素爆発防止対策
- 空冷、SG冷却操作
- 除熱源復旧対策
- ナトリウム火災対策
- 炉外燃料貯蔵槽冷却対策 等

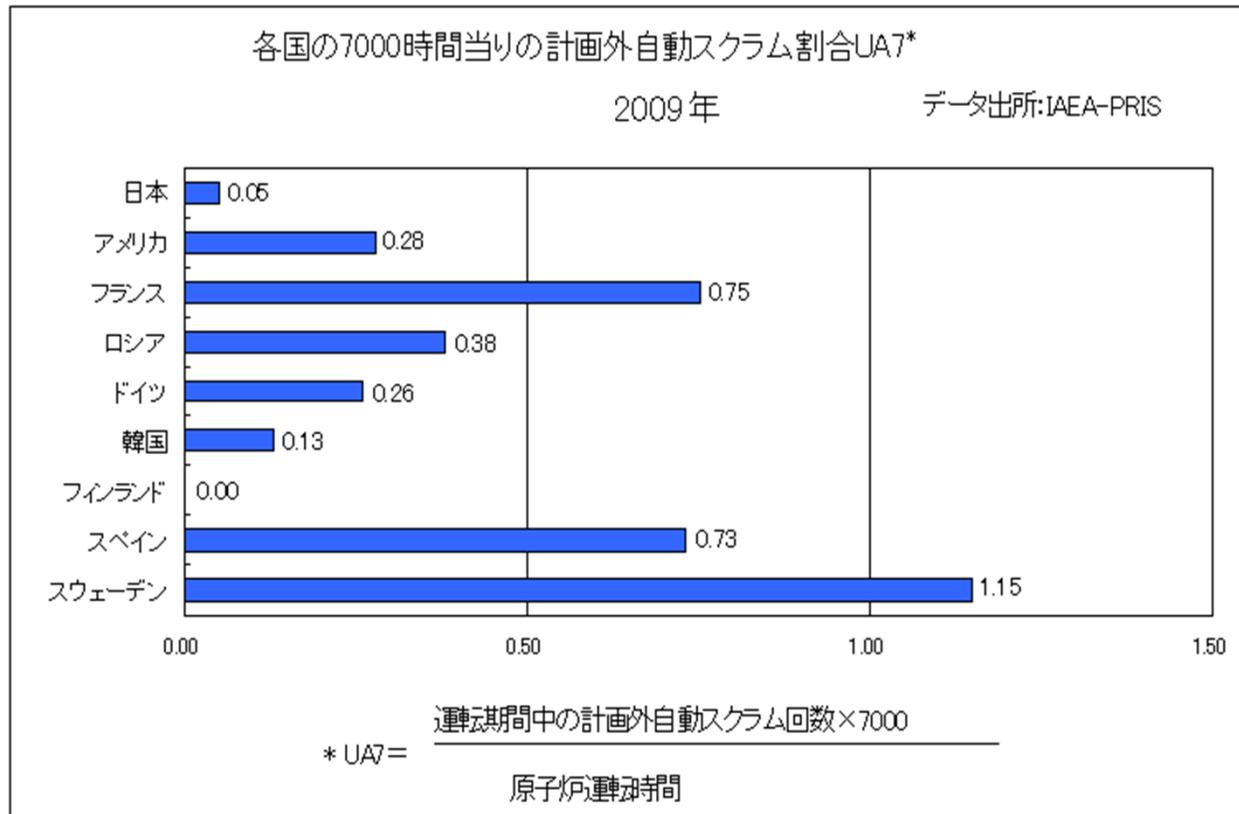
＜実証的な確認や訓練・運用＞

「もんじゅ」に対するSAM手順書を整備し、実機を用いた訓練等を通して適用性を実証。結果に関する有効性をレビューし、向上策を手順書へフィードバック。



研究開発段階発電用原子炉の活用について(報告者意見)

海外に比べ、日本におけるプラントの安全は通常は高水準で維持されている。



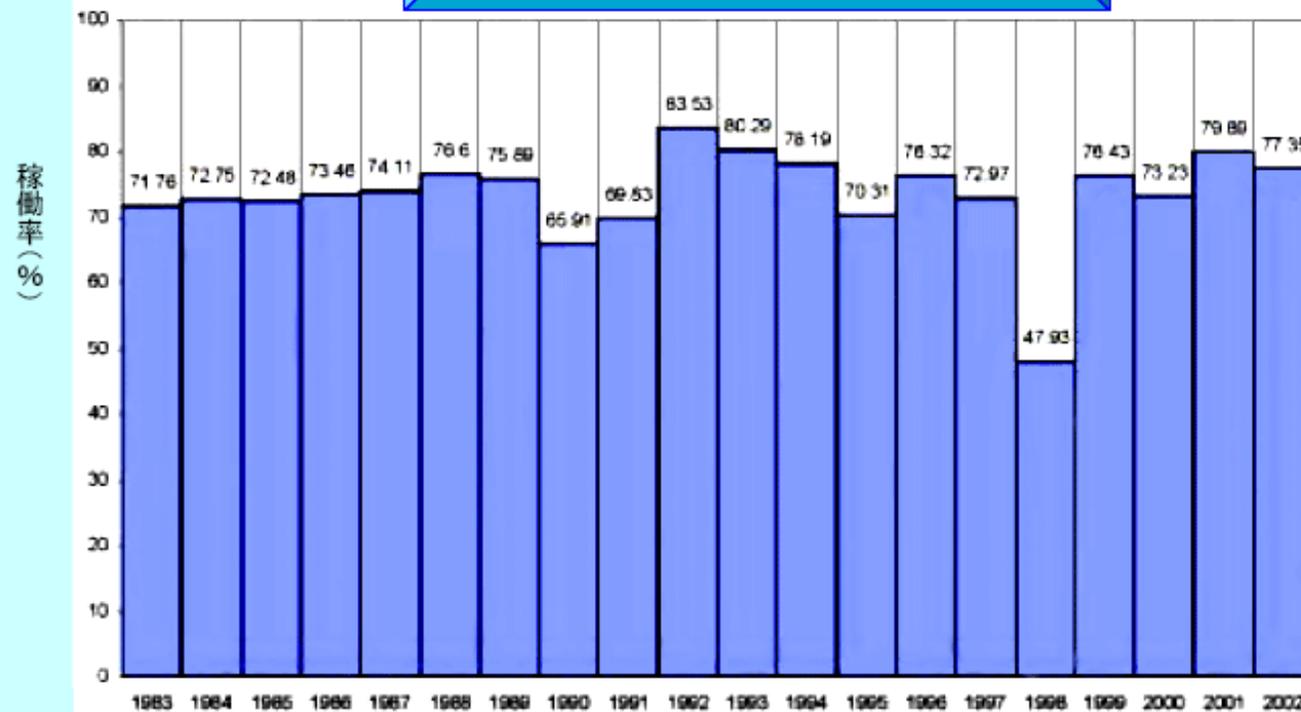
しかし、「もんじゅ」の1995年の1回のナトリウム漏えい事故以来の長期停止に代表されるように、事故に関しては徹底した防止を要求する反面、事故経験と学びの数は少ない。

ロシアの高速炉 BN-600の運転実績

参考
BN-600運転実績

平均稼働率(22年間の運転期間)	74%
2002年の稼働率	77.35%
2003年の稼働率	75.7%

これまでの時間稼働率は平均で約74%(出力換算で約69%)であり、良好な運転実績を示している



BN-600

(参考) ROSENERGOATOM 社ホームページ <http://eng.rosatom.ru/>

[出典] 資源エネルギー庁ホームページ: 原子炉安全小委員会もんじゅ安全性確認検討会(第4回)、配布資料4-3「海外の高速炉におけるトラブル事例等の反映について」、JAEA(平成18年3月)、<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60417b03j.pdf>、20/23

BN-600におけるナトリウム漏えい経験(事故対策を多く学ぶ)

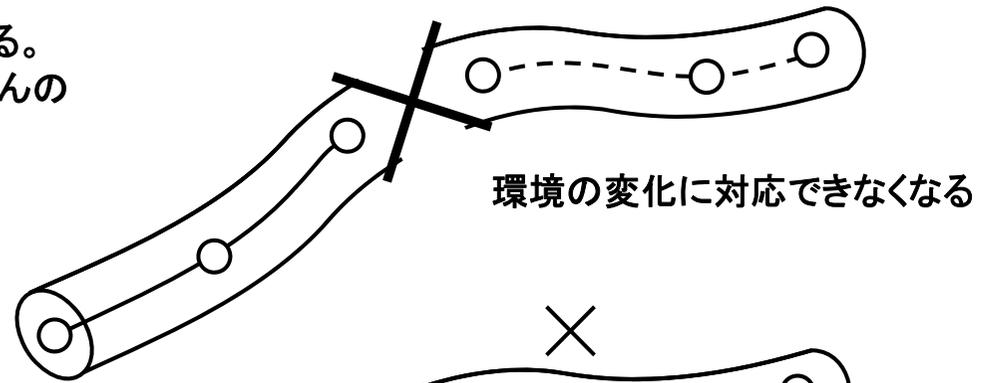
システム	事故の数	漏えい規模(リットル) (下線はナトリウム燃焼事象)	ナトリウム 燃焼事象の数	放射能放出 Ci
1. 原子炉	—	—	—	—
2. 1次冷却系	5			
ガス純化系	1	0.1	—	
ナトリウム純化系	4	0.3, 3.0, 0.2, <u>1000</u>	1	0, 0.2, 0.5, 10
ナトリウム貯蔵システム	—		—	
3. 蒸気発生器	1	未公表	1	
漏えい検出系	1	2	1	—
4. ナトリウム受入システム	3	<u>10, 50, 10</u>	3	—
5. 2次冷却系	17			
主配管	—	—	—	—
主弁	4	<u>1, 300, 30, 10</u>	3	—
ドレンおよび放出ライン	9	<u>0.2, 1, 10, 1, 600, 300, 100, 0, 1</u>	5	—
ドレンライン弁	1	0	—	—
ナトリウム貯蔵システム	3	1, 0, 1	—	—
総 計	27	約 2500	14	10.7

[出典]日本原子力産業会議調査委員会:ロシアの高速炉開発に関する調査報告、日本原子力産業会議
(1997年3月)、p.90

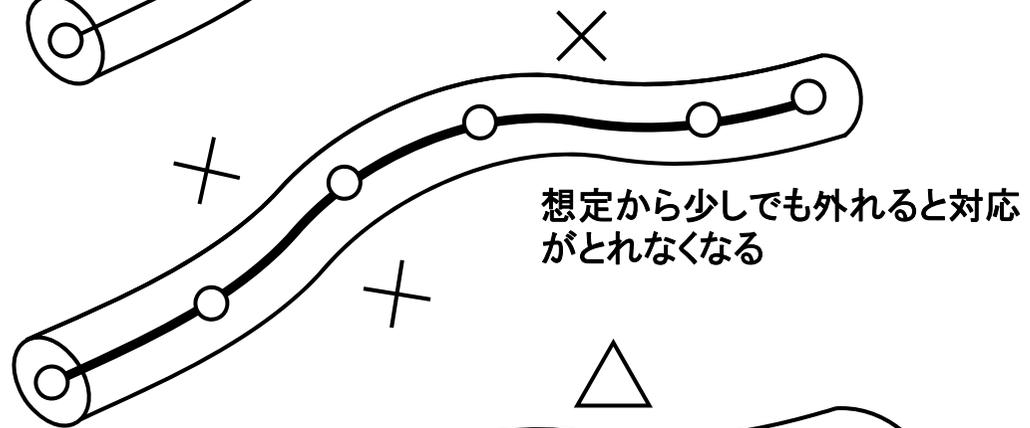
失敗を許さず成功例をなぞったマニュアル化の弊害

システムはいろいろな技術をつないで作られる。
そして、その1つずつの技術の周りにはたくさんの
知見がまとわりついている

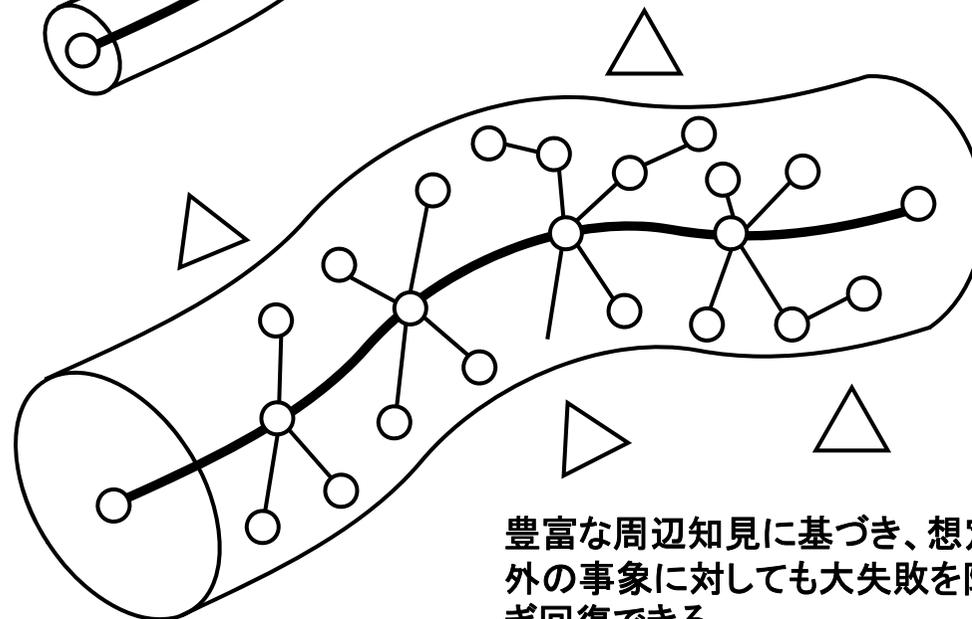
（マニュアル化で育った
人が社長になったとき）



（マニュアル化が
進みすぎたとき）



（個々人のチャレンジ
を許す場合）



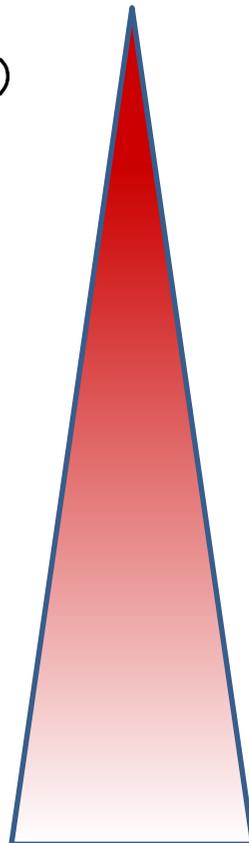
畑村洋太郎, 技術の創造と設計,
岩波書店(2006)に加筆

限られた資源を安全性向上に効率的に活用するには

大事故
(隕石の衝突、等)

中事故
(テロ、等)

小事故
(機器故障、等)



実際の事故の発生頻度

事故は起こらないはず
(安全神話)

↑
事故を起こさない努力
(設計基準、マニュアル、等)



日本での理解のされ方
(二者択一)

事故から人と環境を守る努力

事故を拡大させない努力

事故を起こさない努力



欧米(起こり得ることすべてに対して対応)

おわりに

- 重要度・優先度の高い研究課題を抽出した上で、運転スケジュール等を考慮して策定された「もんじゅ」を活用した研究開発計画を紹介した。
- プラント技術成立性の確認と安全技術体系の構築に関する研究開発の考え方と例を紹介した。
- 絶対安全は世の中に存在せず、事故は必ず起こることを前提として、そのリスクを低減する努力を続けることが、結果として安全の向上につながる。
- 「もんじゅ」を研究開発段階発電用原子炉として活用するためには、研究開発と運転管理を二項対立の構図で議論するのではなく、商業用軽水炉の運転とは次元が異なる面があることも念頭に置き、大事故を起こさないようにした上で一定のチャレンジを許すべき。