

高速炉開発への提言

—もんじゅの経験を踏まえて



2019年9月12日

柳澤 務

元日本原子力研究開発機構

目次

1. 高速炉開発とは
2. もんじゅプロジェクトの教訓
政策/開発体制/技術/社会への対応
3. 実用化への展開
実用化とは/実用化をめざして/学会への期待

自己紹介

新型炉開発(現場)

■ もんじゅ

- 立地～運転再開
- あかつき丸

■ 常陽

- MK-III(100→140 MWt)
長年の運転経験に基づいて

■ ふげん

- 25年間プルトニウム利用政策を支える
(ANSランドマーク賞)
- 計画的廃止措置移行
- 中国研修協力(自主開発)

原子力関係閣僚会議(2016年12月21日)

- もんじゅの位置付けを見直し、原子炉として運転再開はせずに、今後廃止措置に移行するが、今後も高速炉開発を継続していく
- 運転再開により得られる効果が、運転再開の経費を確実に上回るとは言えない状況
- これまで我が国は、国内技術によって高速炉発電プラントを設計、建設、運転できる能力を有することを実在プラントシステムとして実証するとともに、主要な設備、機器等に関するコア技術の基盤を獲得してきた。このように既に相応の知的資産が蓄積されており、これらの知見を活用することによって実証炉の設計段階に向けて開発作業に改めて着手することは十分に可能である。

文科省(高速増殖炉/高速炉の研究開発オプションについて(2012年5月))

- もんじゅ技術成果の達成度を数値化
- 本格運転8年後の期待される成果を100とした場合、炉心試験・照射関連/機器システム試験関連/運転保守関連に大別して、総合達成度は16%と評価している。

原子力委員会

- 建設したことによる目的にある程度達成されたと考えられる
- 今後は商業化を具体的に念頭において高速炉の研究開発を進めるべきである
- 40%の出力運転まで行われており、運転の各段階において様々な技術的成果や知見が得られている

⇒ミスリードのおそろしさ

高速炉開発会議

- 経産、文科両大臣、関連機関代表者(電力、メーカ、原子力機構)
- 学会の見解、地元の意向を取り込んだ議論はない
- 原子力委員会の関与もない
- 各回45分程度

⇒決定プロセスのおそろしさ

原子力学会

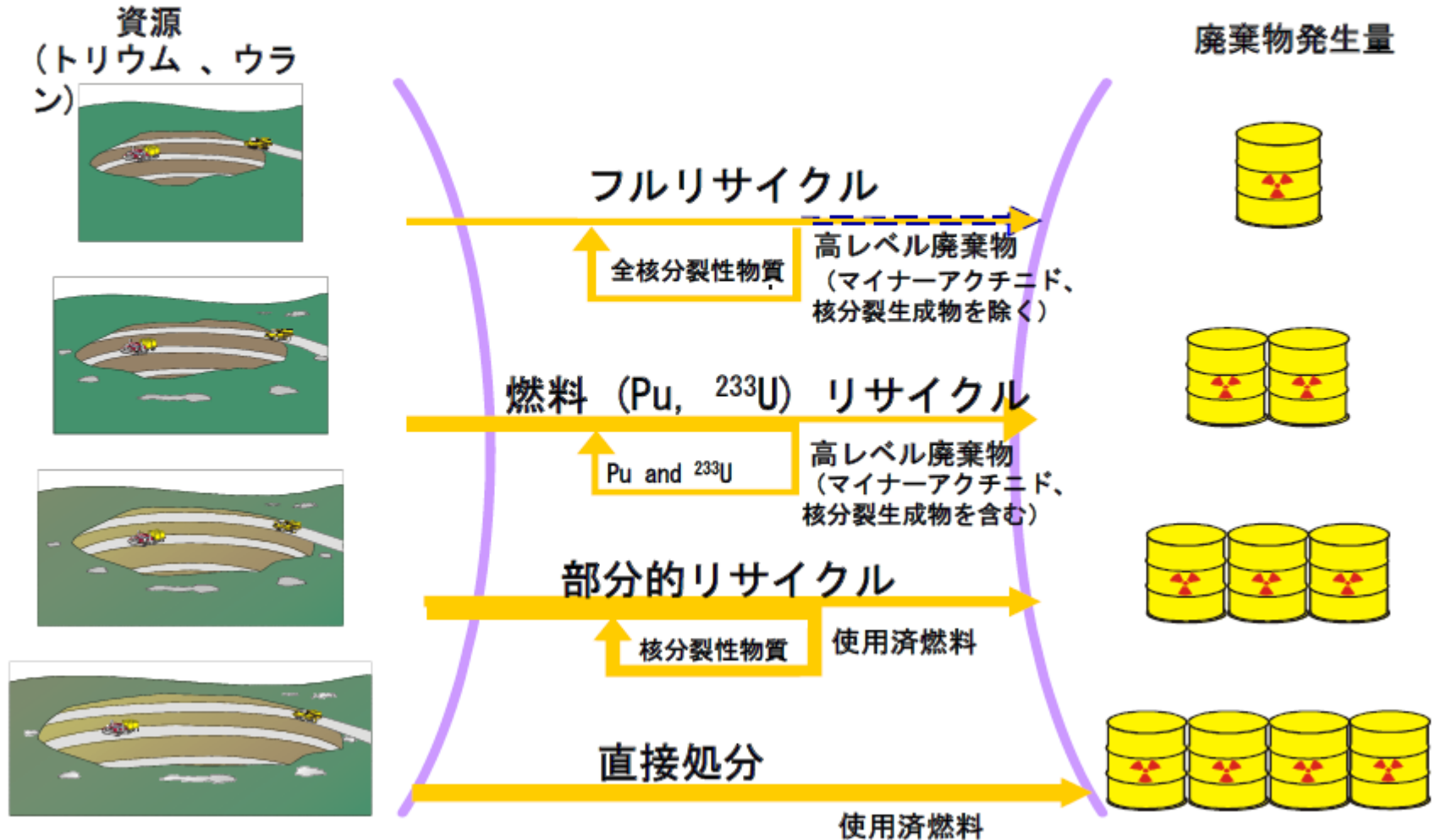
- 高速増殖原型炉もんじゅの有効な活用について(見解) 2016.9.23
 - 安全上の知見や技術の向上をもたらす研究開発施設
 - 原子力規制委員会勧告「在り方に関する検討会」の提言を踏まえ適切な体制のもと無理をせずに段階的に出力を上げ、運転、保守点検の実績を重ね、有効活用を図るべき
 - 真の技術力は、発生する課題を克服しつつ行う自主開発でしか培うことはできない
- もんじゅの意義と活用に関する提言(新型炉部会) 2016.11.22
 - 原型炉にふさわしい新規制基準を策定し、適合性確認、社会からの理解が不可欠
 - 新規制基準策定、許認可に係る検討への速やかな着手
 - 再稼働にあたって適切なコスト抑制方策の工夫・検討により投資を最小化
 - 世界の高速増殖炉サイクルの開発に貴重な貢献を果たす

高速炉開発とは

1. 原子力発電は、核反応でエネルギーを発生させ、蒸気でタービンを回して電気を起こすというより、地球から贈られたウランをくり返し燃やして、エネルギーを利用し、廃棄物を大地へやさしく戻すシステムである。
2. そこに至るのに色々な段階、方式がある。
軽水炉段階で一区切り付ける/軽水炉定着して次の段階に/濃縮ウランで高速炉/
トリウム利用
3. 再処理、高レベル廃棄物処分も一括して俯瞰できる。
4. 国連のSDG(持続可能な開発目標)に核燃料サイクルは沿うシステム
5. 高速炉はその循環型リサイクルの中核
1994年の原子力長計では「リサイクル炉」という表現も。
6. 軽水炉での大量の劣化ウラン、使用済燃料を資源として再利用
高度な再処理技術で有用元素の回収、核転換。

原子力発電とは

大地から贈られた（借りた）ウランを繰り返し燃やし、エネルギーを利用し、大地へやさしく戻す



原子力を支える技術

1. 核反応による核種転換

2. 核種分離

⇒高速炉を中核とした核燃料サイクルは、各核種まで注目する「周期律工学」

→周期律表で、地球に存在する最後の元素
ウラン(U235)が核分裂反応を起こす
(オクロの天然原子炉)

→宇宙や地球との対話

高速炉開発と核爆弾開発

□ インド(当初平和利用)

- 1969年プルニマ(Purnima)プロジェクト承認
- 出力1WのPu239酸化物燃料のパルス型高速炉
- 高速炉炉心の核特性把握と核爆発の初歩的開発
臨界超過の動特性解析等

□ フランス

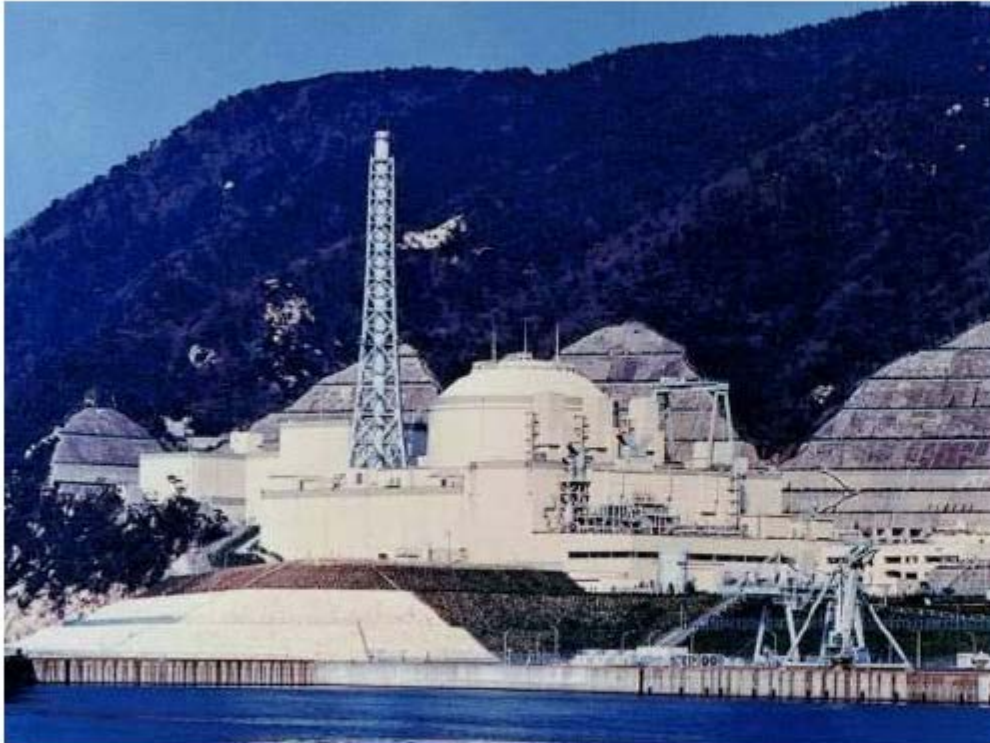
- 高速炉ブランケットからの兵器級プルトニウム生成に関心

□ 中国の原子力後発国への高速炉輸出攻勢

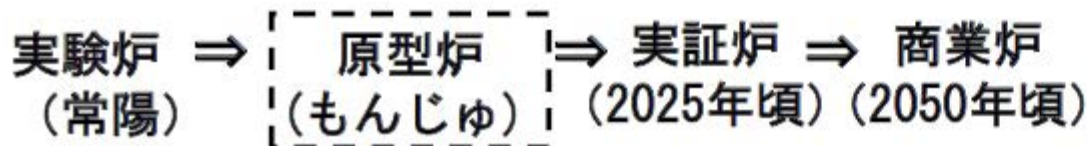
⇒プルトニウム利用の万全の国際管理強化

高速増殖原型炉「もんじゅ」のあゆみ

電気出力 280MWe
ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心



- 昭和58年 5月 原子炉設置許可
- 昭和60年10月 建設工事開始
- 平成 3年 5月 機器据付完了、試運転開始
- 平成 6年 4月 初臨界
- 平成 7年 8月 初送電
- 平成 7年10月 40%出力到達
- 平成 7年12月 ナトリウム漏えい事故
↓
安全性総点検
- 平成14年12月 改造工事に係る原子炉設置 変更許可
- 平成17年 2月 改造工事事前了解
3月 改造準備工事着手
9月 本格工事着手
- 平成18年12月 工事確認試験開始
- 平成20年 2月 初装荷燃料設置変更許可
- 平成22年 5月 運転再開



高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転再開

2010年(平成22年)5月6日(木曜日)

号外 福井新聞

発行所 福井県大浜市福井 電話 0776(3)2111 福井新聞社10年

もんじゅ運転再開

14年5カ月ぶり、8日臨界

日本原子力研究開発機構は6日午前10時30分、1995年のナトリウム漏れ事故で停止していた高速増殖炉「もんじゅ」(敦賀市)の原子炉を起動し、14年5カ月ぶりに運転を再開した。8日には原子炉が核分裂が連続して起きる臨界に達する見通し。性能試験(試運転)の第1段階となる炉心温度調整試験が7月下旬まで続けられる。

福井県敦賀市にある高速増殖炉「もんじゅ」の原子炉が6日午前10時30分に起動し、14年5カ月ぶりに運転を再開した。原子炉が核分裂が連続して起きる臨界に達する見通し。性能試験(試運転)の第1段階となる炉心温度調整試験が7月下旬まで続けられる。



14年5カ月ぶりに運転を再開した高速増殖炉「もんじゅ」(6日午前10時30分ごろ撮影)。(NHK)

日本原子力研究開発機構は6日午前10時30分、1995年のナトリウム漏れ事故で停止していた高速増殖炉「もんじゅ」(敦賀市)の原子炉を起動し、14年5カ月ぶりに運転を再開した。8日には原子炉が核分裂が連続して起きる臨界に達する見通し。性能試験(試運転)の第1段階となる炉心温度調整試験が7月下旬まで続けられる。

ご購読・試読のお申し込みは 0120-291001

平成22年5月6日(木)午前10時36分、試運転(性能試験)を再開いたしました。



【向もんじゅ所長から岡崎理事長への報告】

もんじゅプロジェクトの教訓

総括

- 原子力に係る新しい技術の実用化を目指して開発を進めるにこれまでに馴染みのない技術を使いこなしていく場合、開発プロジェクト自体、及び携わる関係者に新しい技術自体、それに対して向き合う姿勢、開発体制、社会への向き合い方に格別必要とされる慎重さ、謙虚さが十分でなかった。
- 新しい技術開発でつまずきがあれば、社会が心配することへの備え、構えができていなかった。
- 開発当事者は技術開発に挑戦する意気込みが強すぎることに引きずられ、社会への向き合い方への配慮が足りなかった。

多様な人材と相当の陣容を整えておく必要があった。

- もんじゅは、試験、運転を通じて、事故、トラブル・不具合等を経験し、原因究明、調査研究、対策、品質保証活動の改善、社会への説明責任等を通して、それらを克服しつつ、技術や人材、規制が育っていく道場。それらに応えられる備え、構えが脆弱であった。

もんじゅプロジェクトの教訓

I. 政策面

i) 実用化見通し

- 高速炉実用化はもんじゅ運転10年後(動燃設立20年後)
- 米国、軍用潜水艦動力炉の軽水炉(PWR)の冷戦下の開発成功
- 新型炉でも、多少の手戻りは覚悟しても計画通り進めればうまくいく
→実用化の道の困難の認識不十分(政策立案/技術者)

ii) 開発方針

- Na漏えい事故後、拙速に実証炉計画を実用化へ繋げるのではなく
国際的技術開発・研究開発センター
→スケジュールはステップアップ

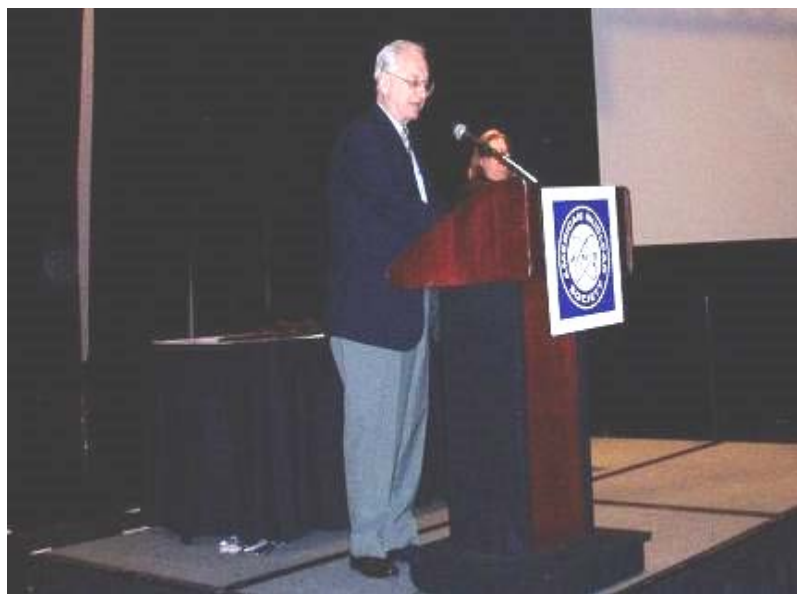
iii) プルトニウム利用計画

- ふげんは25年間プルトニウム利用政策を支えた(ANSランドマーク賞)
- もんじゅは実証炉とセットで路線に乗っていた
→事故後は、運転の支障で計画が破綻しないよう包括的見直しが必要

「ふげん」米国原子力学会ランドマークアワード受賞

我が国では初めての受賞

- ・ 原子力エネルギーの平和利用
- ・ 新しい道の開拓
- ・ 20年以上の実績



米国原子力学会ウィンターミーティング
(2003年11月18日 ニューオリンズ)



新型転換炉ふげん発電所
(2004年4月26日 敦賀市)

もんじゅプロジェクトの教訓

iv) 保障措置優良国

- 高速炉開発の歴史は核兵器との接点多い
- 国を挙げてのあかつき丸によるプルトニウム輸送
→プルトニウム利用のインフラ、周辺技術により現実に日本で利用されている実感が国内外で薄くなる

II. 開発体制

i) 長期停止による現場力の弱体化

電力の人的協力にブレーキ/設計条件との対比/規制面からの配慮検討

ii) 改革活動の風化(動燃/サイクル機構/原子力機構)

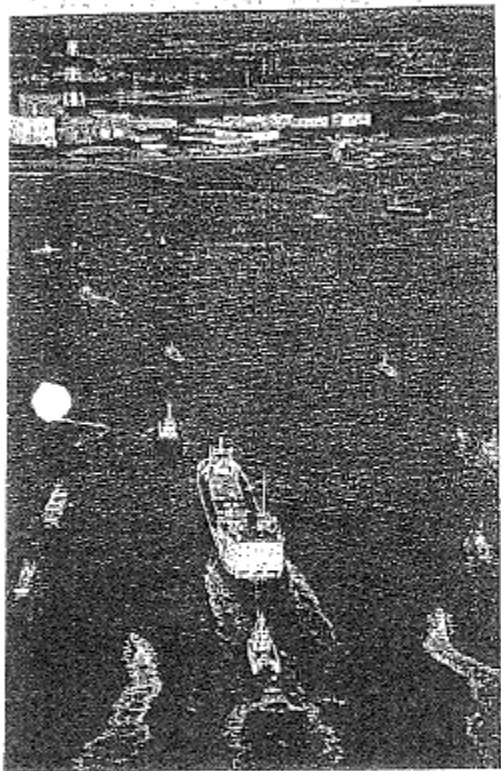
- PDCAのチェック機能の強化
- 経営層と現場の一体化

iii) 完遂指向

- プロジェクト専任役員
- 監督官庁が前面に(国鉄民営化)

→責任体制不明確

「あかつき丸」東海港に入港



遊覧船などに守られ東海港（上）に入港する「あかつき丸」。5日午前6時35分、本社へりから

134日ぶり

プルトニウム1トン 厳戒下の荷揚げ

【東京5日電】原子力発電用燃料の輸送船「あかつき丸」が、東海港（上）に入港し、プルトニウム1トンの荷揚げ作業が行われた。船内には厳戒態勢が敷かれ、作業は慎重に行われた。

「あかつき丸」は、フランスのブレスト港から日本へ向けて出航し、東海港（上）に入港した。船内にはプルトニウム1トンの燃料が積まれている。この燃料は、原子力発電用の燃料として使用される。

入港後、船内には厳戒態勢が敷かれ、作業は慎重に行われた。作業は、船内のプルトニウムを、陸揚げ用の容器に移す作業が行われた。作業は、約1時間で行われた。

作業は、船内のプルトニウムを、陸揚げ用の容器に移す作業が行われた。作業は、約1時間で行われた。

【東京5日電】原子力発電用燃料の輸送船「あかつき丸」が、東海港（上）に入港し、プルトニウム1トンの荷揚げ作業が行われた。船内には厳戒態勢が敷かれ、作業は慎重に行われた。

「あかつき丸」は、フランスのブレスト港から日本へ向けて出航し、東海港（上）に入港した。船内にはプルトニウム1トンの燃料が積まれている。この燃料は、原子力発電用の燃料として使用される。

入港後、船内には厳戒態勢が敷かれ、作業は慎重に行われた。作業は、船内のプルトニウムを、陸揚げ用の容器に移す作業が行われた。作業は、約1時間で行われた。

作業は、船内のプルトニウムを、陸揚げ用の容器に移す作業が行われた。作業は、約1時間で行われた。



「あかつき丸」と「ししま」フランスに向けて出港
出典 1992, No. 457
世界の船舶 11

PLUTONIUM CARRIER & HER ESCORT LEAVE JAPAN FOR FRANCE

もんじゅプロジェクトの教訓

III. 技術

- i) 全ての活動が試験
 - 規制活動も含めすべて新しい試験
- ii) ナトリウム技術
 - 研修棟/消防研究所/常陽・火災
 - 懸念される技術の研究継続
- iii) 他分野へのアンテナ(軽水炉と異なる)
- iv) 海外経験の反映
 - 設計への反映を重視
 - 発生時の措置、適応力の育成・訓練
 - 事故・トラブル事例集
- v) 研究開発段階の保全計画
 - 安全確保をしつつの運転経験
 - 実用化への技術挑戦
 - 科学的合理性をもって整備

想定される事故・トラブル事例集の作成



『改造工事における事故・トラブル事例集』
(平成18年2月配布)

事例は大別すると4分類された27事例

- ①ナトリウム系の改造工事に特有な事例
- ②火災の事例
- ③作業中の人身障害の事例
- ④作業や操作中の事例

+



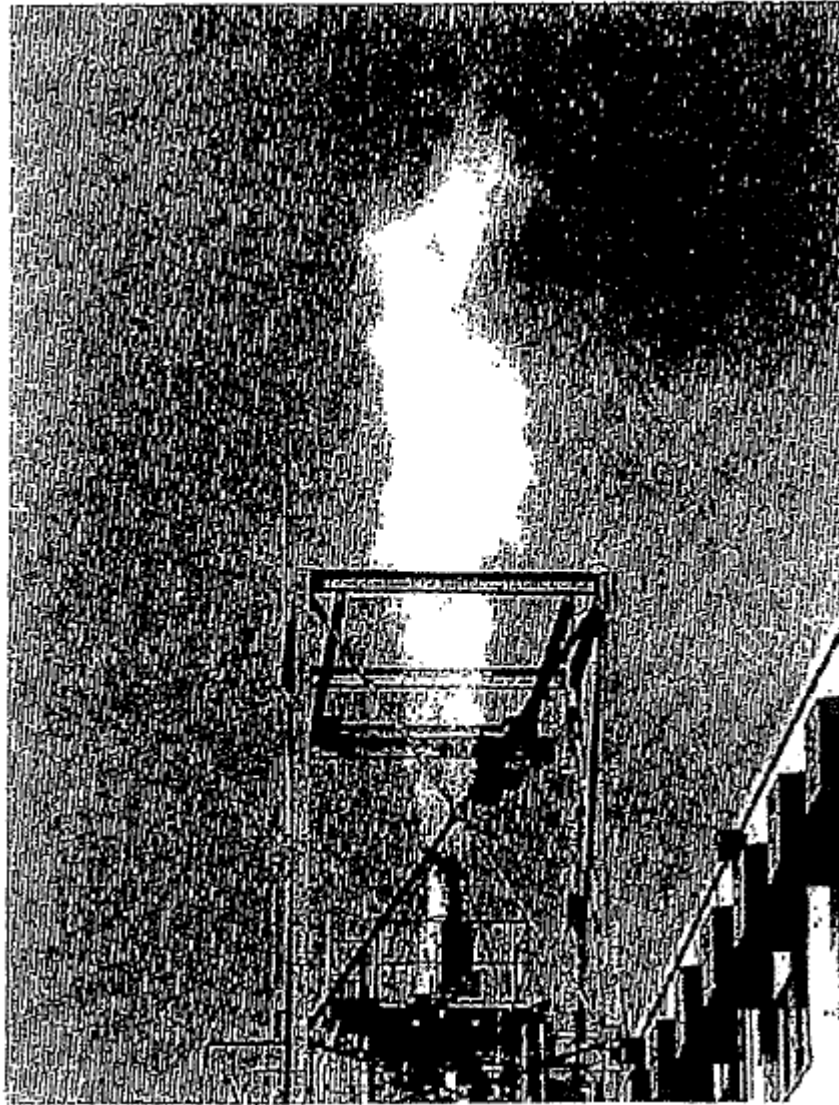
『運転等において想定される事故・トラブル事例集』
(平成18年8月配布)

事例は大別すると6分類された118事例

- ①海外高速増殖炉の辞令から想定される事例
- ②国内軽水炉等の事例
- ③「常陽」で過去に起きた事例
- ④「もんじゅ」で過去に起きた事例
- ⑤「もんじゅ」の設備条件等から考えられる事例
- ⑥「もんじゅ」の安全審査で想定した事例

今後も国内外のトラブル事例を踏まえ随時追加します

反応生成物収納容器よりの水素ガス燃焼



SWAT-3試験

もんじゅプロジェクトの教訓

IV. 社会への対応

i) 新しい技術体系への透明性不足

- 社会からの関心が高い
- 技術開発は専門家に任されている意識
- 広聴・広報・地域交流の経営理念

ii) 地域振興・大学との連携

- 新しい技術開発を地域の技術向上に
- 福井県エネルギー研究開発拠点化計画
- 大学は地方の知の殿堂
- ふげんによる国への不信感
- 事前の立地振興構想(米・国家環境政策法)

福井県エネルギー研究開発拠点化計画

基本施策

1. 安全・安心の確保

- 高経年化対策の強化と研究体制等の推進
- 地域の安全医療システムの整備
- 陽子線がん治療を中心としたがん研究治療施設の整備

※ 赤文字は関係機関等と協力して原子力機構で実施

欧米、アジア各国
IAEA 等

県内、関西中京圏の
大学・研究機関

3. 人材の育成・交流

- 県内企業の技術者の技能向上に向けた技術研修の実施
- 県内大学における原子力・エネルギー教育体制の強化
- 小学校、中学校、高等学校における原子力・エネルギー教育の充実
- 国際原子力情報・研修センター
- 国等による海外研修生の受入れ促進
- 国際会議等の誘致

人材(知)の集積

県内企業

計画の推進体制

エネルギー研究開発
拠点化推進会議

エネルギー研究開発
拠点化推進組織
(若狭湾エネルギー研究センター)

4. 産業の創出・育成

- 産学官連携による技術移転体制の構築
- 原子力発電所の資源を活用した新産業の創出
- 企業誘致の推進

地域産業の活性化

2. 研究開発機能の強化

- 高速増殖炉研究開発センター
- 原子炉廃止措置研究開発センター *
- 若狭湾エネルギー研究センターの新たな役割
- 関西・中京圏を含めた県内外の大学や研究機関との連携の促進

技術の集積

電力事業者、原子力
発電プラントメーカー等

* 「新型転換炉ふげん発電所」を廃止措置に係る法手続き後に改称予定

高速炉の実用化とは

(I) 開発目標 (Gen-IV)

安全性/経済性/持続可能性(資源有効利用、環境保全)/核拡散抵抗性

(II) 社会からの要請

- (i) 安全性の納得・規制手続きの整備
- (ii) 供給安定性・信頼性
- (iii) 経済性(社会が受け容れる)
- (iv) 産業活動の達成
- (v) プルトニウム管理が心配ない
- (vi) 燃料供給、使用済燃料、廃棄物処理の整備
- (vii) 国際的規範に沿っている
- (viii) 若い人の仕事
- (ix) 実施体制の信頼性

4.1 実用化をめざして

- もんじゅ(原型炉)は、試験、運転を通じて事故・トラブル・不具合等を経験し、原因究明、調査研究、対策、品質保証活動の改善、社会への説明責任等を通して、それらを克服しつつ、技術や人材、規制が育っていく道場
- 欧州、米、ロシアと異なり高速炉発電プラントの本格的運転経験はない
- 原型炉段階は、開発当事者、規制、社会が様々な経験を蓄積する機会
- 軽水炉の運転経験 13,000炉・年/高速炉 300-400炉・年

もんじゅでやり残したこと —性能試験中断・運転経験未達

□ 全般

- 性能評価に基づく設計検証(プロセス・手法の検証、改良)
- 出力増強検討(MK-II)
- 事故・トラブル事例集の活用・整備

□ 炉心・燃料

- 燃料照射(燃焼度5.5万/8万 MWD/t)
- 照射後試験(大洗)
- 高次化プルトニウム/MA入り燃料
- 燃料破損(タグガス)

□ プラント技術

- 電力系統とのネットワーク(過渡応答)
- 自然循環除熱試験
- 定期点検(考え方、段取り)
- 保全計画整備・改良
- 燃料交換作業
- ISI・オンラインメンテナンス
- 蒸気発生器まわりのトラブル

[海外炉の運転経験]

- もんじゅの経験をあきらめるなら、海外炉の生きた運転経験を我がこととする覚悟。豊富な運転経験のロシア、実験炉ながら様々な経験等を行っているインド、中国との技術交流の道を容易なことではないが何としてでも探る気概

[国際FBR研修センター(海外高速炉との連携)]

- 海外高速炉の運転・保守経験成果の集約、データベース化
- もんじゅ実機設備を調査・評価研究の対象とする
- もんじゅ実機設備を海外にも開かれた若手技術者・学生への研修材料
- ISIの実機条件下での動作・操作試験により保全技術の高度化
- プラントシミュレータによる運転技術の高度化、事故・トラブル事象の研究や事故・トラブル事例集の拡大・深化
- ナトリウム研修棟(消火、ループ運転)の継続

[再利用の検討]

- もんじゅのマネジメントを原点に戻って検討、再構築
- 新しい技術体系開発への要塞化
- 新たな技術開発成果を反映・改良(TREAT、FFTF)

→再利用(新生)の検討を！

プラント技術交流

□ プラント駐在

(原型炉) ・Phenix、 SPX

・PFR / SNR-300 / CRBR

(実験炉) ・DFR

・FFTF

・Fermi

□ 技術交流(プラント)

・BN-600、BN-350、BOR-60

・FBTR

・IAEA ・IWGFR(TWG-FR)(最古1967年より、50回以上)

・WANO ・FBRグループ(1997年より)

4.2 プロジェクト推進

- 実用化を目指すプロジェクト
- バトンタッチ方式でよいか
- 原型炉が設計を終え、建設に入る段階から科学技術政策でなく産業政策の一環として位置付け直して民間の主体的参入を促す方式
- 大規模なチェック&レビュー

4.3 プルトニウム政策

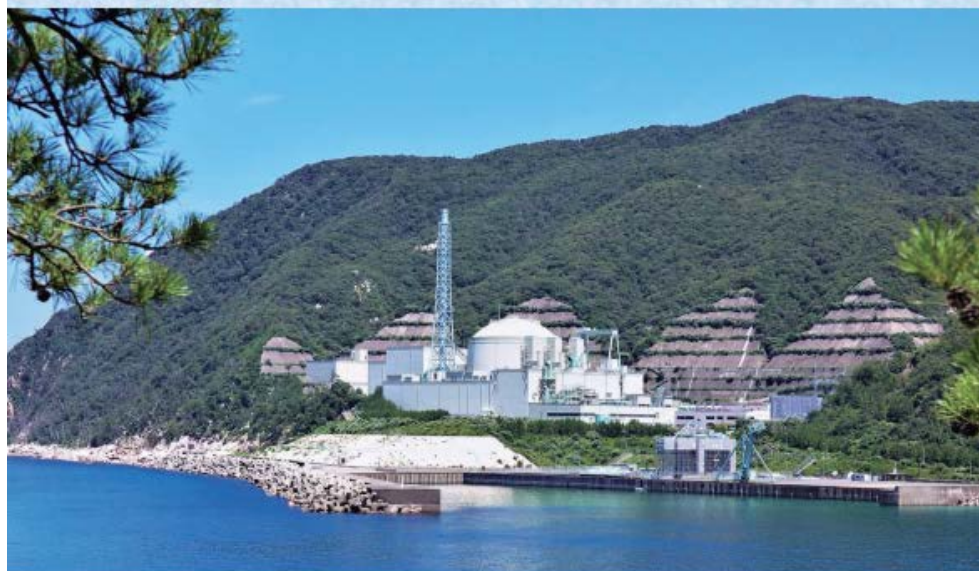
- プルサーマル使用済みMOXは六カ所再処理の対象ではない
- MOX使用済燃料の中間貯蔵と高速炉での利用をセットとしない限り、中間貯蔵の立地も進まない

4.4 学会への期待

- 「高速炉開発に関する技術戦略」の議論・アピール
- 高速炉開発会議、「最先端の研究開発」と「安全な発電事業の実施」という性格が異なる要素が混在する難しいプロジェクトとしている
- 実証炉以降の開発に資する様々な成果、知見が蓄積され、燃料供給等関連技術、人材育成基盤の成果も得られている →やり残したことは多く、吟味が必要
- ナショナルプロジェクトの廃止を本腰を入れて総括する時期
- 技術開発環境の整備・維持

高速増殖原型炉もんじゅ — その軌跡と技術成果 —

Prototype Fast Breeder Reactor Monju
— Its History and Achievements —



目次

はじめに	1
1. 開発経緯と実績	3
2. 設計・建設	9
3. 試運転	19
4. 原子炉安全	29
5. 炉心技術	47
6. 燃料・材料	57
7. 原子炉設備	69
8. ナトリウム技術	99
9. 構造・材料	109
10. 運転・保守	121
11. 事故・トラブル経験	137
おわりに	149
付録 1. 基本仕様の選定	152
付録 2. 「もんじゅ」のあゆみ	156

もんじゅ計画の経験を活かせ — 自主開発魂の灯

エネルギーレビュー誌連載

2017年

- 8月号 「MOZART計画の原子力学会表彰」
原子力システム研究懇話会 柳澤 務(原子力機構)
- 9月号 「【もんじゅ】復活と実証炉への期待」
大阪大学 名誉教授 宮崎 慶次
- 10月号 「もんじゅ設計はKnow Howでなく、Know Whyだった」
エネルギーシンクタンク(株)代表 田下 正宣(三菱)
- 11月号 「【もんじゅ】と私」
日本宇宙フォーラム理事長 坂田 東一(文科省)
- 12月号 「わが国の原子力技術開発のあり方」
関西大学社会安全学部 教授 小澤 守

2018年

- 1月号 「もんじゅ取材40年 何を間違えたのか」
元福井新聞社編集本部長 四戸 友也
- 2月号 「難産だった「もんじゅ」初装荷燃料の製造」
元JNCプルトニウム燃料副センター長 出口 守一(原子力機構)
- 3月号 「【もんじゅ】の思い出と今後の高速炉開発に対する注文」
福井大学付属国際原子力工学研究所 特任 竹田 敏一
- 4月号 「【もんじゅ】の回想と思い」
前敦賀市長 河瀬 一治
- 5月号 「もんじゅと安全規制」
東北大学 特任教授 平岡 英治(原子力安全・保安院)
- 6月号 「【もんじゅ】開発で経験したリーダーの決断」
日立製作所 名誉顧問 住川 雅晴

- 7月号 「【もんじゅ】のこれからの役割」
福井工業大学 原子力技術応用工学科 教授 来馬 克美(福井県庁)
- 8月号 「もんじゅと防災」
秋田県立大学システム科学技術学部 機械 鶴田 俊(消防研究所)
- 9月号 「【もんじゅ】廃炉が意味するものを考える」
日本原子力発電(株)元副社長 浜崎 一成
- 10月号 「【もんじゅ】の思い出 日本の核燃料サイクルへの期待」
元原子力委員会委員長代理 遠藤 哲也(代表部大使)
- 11月号 「原子力100年の計「反省」「学習」「克服」「進化」」
東京工業大学 名誉教授 齋藤 正樹
- 12月号 「【もんじゅ】原子炉上部機器づくりの主役はDesign by R&D」
元東芝 首席技監 松村 誠

2019年

- 1月号 「【もんじゅ】の失敗に学ぶ」
科学ジャーナリスト 小出 重幸(読売新聞)
- 2月号 「もんじゅ復活を望む」
武蔵大学学園長 有馬 朗人(文科大臣)
- 3月号 「【もんじゅ】安全確保、向上への挑戦」
元東海大学原子力工学科 教授 可見 吉男(原子力機構)
- 4月号 「【もんじゅ】開発の目的とは一体、何であったのか」
元日本原子力研究開発機構 理事長 殿塚 猷一

新しい技術開発とは

山本七平 : 「完成品輸入の歴史しかもたない我々には、実際に始動してみても、初めて発見されるものが多いことを当然の事として認識していない。」

畑村洋太郎 : 「どんな技術でも成熟して誰もが安心して使えるようになるまでに、大体200年はかかります。せいぜい50年程度の歴史しかない原子力は、まだまだ若い技術であるといえます。技術を安全に使いこなすために必要な経験をまだ十分に積んでいないということを意味します。こういう技術を扱う場合、大袈裟に思えるくらい丁寧に扱う必要があります。」

IAEA事務局長 天野之弥氏 ご逝去

- IAEAは技術的機関なので各国の発言や声明を分析するのではなく、事実を分析することを中心に。
 - 政治的発言は控え、技術と専門性の役割を強調で信頼と評価
 - 「類いまれなプロ意識と献身。最も中立な形で国際社会に役立ってきた」
 - EU モゲリーニ外交安全保障上級代表
 - 1. イランの核合意の検証/北朝鮮専門チーム発足・査察準備
 - 2. 原子力平和利用(医療・農業)と発展途上国への技術協力
-
- 多様な国の開発現場、生きざまを見られ、人間と原子力のあり方をどう見られてきたのか。(残念)

謹んでご冥福をお祈り致します。