

(独) 日本原子力研究開発機構の
高速実験炉「常陽」の役割と
今後の必要性に関する検討報告書

2009 年 4 月

「常陽」利用検討委員会

目 次

報告要旨	1
緒 言	4
1. 炉内干渉物対策について	5
1.1 炉内干渉物の発生経緯	5
1.2 「常陽」再起動に向けた復旧方法と計画	8
1.2.1 再起動に向けた復旧方法	8
1.2.2 再起動に向けた復旧計画	8
1.2.3 炉内観察・復旧により得られる技術的成果	9
2. 「常陽」の役割と今後の必要性	13
2.1 我が国の FBR 開発における「常陽」の位置付け	13
2.2 「常陽」の技術的特長	17
2.3 国内での照射データ取得の意義	22
2.4 「常陽」と「もんじゅ」の役割分担	25
2.5 「常陽」再起動後の利用ニーズ	27
2.5.1 FaCT プロジェクト・FBR 実用化に向けた燃料・材料開発	27
2.5.2 FBR 開発を支える基礎基盤技術開発	30
2.5.3 FBR 開発を支える人材の育成	32
2.5.4 FBR 開発に係る国際協力における「常陽」の必要性	34
2.5.5 外部照射ニーズへの貢献	36
結 言	38
添付-1 「常陽」利用検討委員会の構成	40
添付-2 審議の経過	41
「常陽」利用検討委員会（第 1 回）議事概要	42
「常陽」利用検討委員会（第 2 回）議事概要	45
「常陽」利用検討委員会（第 3 回）議事概要	47
添付-3 原子力政策大綱等の一部抜粋	48
付録 「常陽」利用検討委員会 資料	51
参考資料 「常陽」の概要	98
用語解説	103

報告要旨

「常陽」利用検討委員会において、(独)日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)の「常陽」の役割と今後の高速実験炉・照射炉の必要性を検討し、この結果を踏まえて「常陽」再起動の妥当性及び必要性を明確にするとともに、再起動後の「常陽」の効果的な利用等に対して議論した。その結果、高速増殖炉(以下、「FBR」という。)の実用化に向けた研究開発を主目的とした実験炉・照射炉は必要であり、「常陽」は今後も以下の役割を有する必要不可欠な施設であることから、干渉物対策を早急に進め、早期に再起動させるべきであるとの結論を得た。

- ・ FBR サイクル実用化に向けた燃料・材料開発
- ・ 設計裕度を把握し、合理的な設計に反映するための限界照射試験
- ・ 安全性・経済性の更なる向上のための新技術実証試験
- ・ 制御された先進的照射装置を用いた高精度な照射試験
- ・ FBR 研究者、技術者の育成 等

(1) 委員会における検討結果

「常陽」の再起動に向けた復旧計画及び「常陽」の役割と今後の必要性に関する委員会での検討結果の概要を以下に示す。

① 「常陽」の役割と今後の必要性

(i) FaCT プロジェクト・FBR 実用化に向けた燃料・材料開発

FBR サイクル研究開発(以下、「FBR 開発」という。)は国家基幹技術の一つとして位置付けられ、我が国のエネルギー政策上の重要課題である。「常陽」は高速実験炉として、国産技術による FBR の技術的成立性の実証、燃料・材料の照射試験、炉心・プラント特性評価技術等、FBR 関連の基礎基盤技術の蓄積等に大きな役割を果たし、これらの成果は原型炉「もんじゅ」の設計・建設等に大きく寄与した。今後においても、「常陽」は、世界最高の照射能力・技術・精度及び照射後試験施設を有することから、FBR サイクル実用化研究開発(以下、「FaCT プロジェクト」という。)において計画している高燃焼度概念の成立性評価試験、設計用データ拡充のための溶融限界線出力照射試験、環境負荷低減のためのマイナーアクチニド含有燃料開発に係る照射試験等の実施には欠くことのできない施設である。

「常陽」を再起動しない場合、「もんじゅ」及び海外炉での代替照射が考えられるが、当面「もんじゅ」は発電プラントとしての信頼性の実証に優先的に取り組む計画であり、FaCT プロジェクトで要求されている照射試験を所期の計画どおり実施することは難しい。また、海外炉で代替する場合、相手国の政策変更やコスト変動のリスク、燃料輸送の問題、試験の自由度の制

約等の課題もあるため必要な照射データを計画どおりに取得できない可能性があるとともに、国内で照射データを取得するメリットである「質・量ともに充実したデータ」、「開発の計画的な推進と時間的な即応性」、「国内技術の向上・蓄積」等がなくなり、FBR 開発に支障が生じるとともに、我が国の国際的な技術的優位性及び競争力の低下が懸念される。

FaCT プロジェクト以降の FBR 開発においても、設計の合理化・高度化を図りさらなる安全性・経済性等の向上、安全規制に係る照射データの拡充を図る必要がある。特に、燃料設計手法の合理化や燃料製造公差の緩和のための照射試験、製造・再処理技術と連動した核拡散抵抗性向上に係る対応方策の実証等が重要となる。

また、「もんじゅ」が高速中性子照射場として確立された後も、「常陽」と「もんじゅ」がそれぞれの特徴を活かし、「常陽」では革新的な燃料・材料の先行照射試験や、高精度な照射試験による基礎データの取得、「もんじゅ」では集合体レベルでの性能の実証等、その役割を分担することで、実用炉開発に必要な安全性・経済性等の向上に係る照射データを取得することが可能となる。

(ii) FBR 開発を支える基礎基盤技術開発・人材の育成

FBR 基礎基盤技術開発においても、実験炉である「常陽」は試験目的に合わせた柔軟な原子炉の運転・照射試験が可能であるため、革新技術の実証、先進的・革新的プラント計測技術開発、炉心・プラント安全性評価のための実証試験等に供することができる。また、高精度な照射条件評価技術や照射条件の制御が可能な先進的照射試験装置を有しており、燃料・材料照射挙動メカニズムの解明、新しい解析法等の導出・適用性検証が可能である。これらの技術開発を推進し、実機データの活用による研究の活性化を図ることは「常陽」の大きな役割であり、人材育成や大学の原子力教育・研究の向上、産業界の技術基盤の維持の観点でも、「常陽」の利用ニーズは高い。

(iii) FBR 開発に係る国際協力

国際的な視点では、第 4 世代原子力システムの研究開発に関する国際フォーラム（GIF）等の FBR 開発に係る枠組みの中で、世界的にも数少ない高速中性子照射炉である「常陽」は、我が国が国際競争力を備え、世界の FBR 開発をリードする上で貴重な研究施設である。

② 復旧計画を踏まえた「常陽」再起動の妥当性

「常陽」では 2007 年に発生した計測線付実験装置試料部と回転プラグの干渉による燃料交換機能の一部阻害及びその後確認された炉心上部機構下面の整流板等の損傷により、原子炉を再起動するためには、炉心上部機構の交換及び干渉物である計測線付実験装置試料部の回収が必要である。

これにより、「常陽」の再起動時期の目標は 2012 年度、復旧費用は約 35 億円となるが、再起動後、順次 FaCT プロジェクトに必要な照射試験を実施することによって、2015 年を目標とした実証炉の概念設計やその後の安全審査に必要な照射試験データを取得でき、さらに、包括的アクチニドサイクルの国際実証（GACID）計画等の国際協力にも我が国が主体的に貢献できる。また、復旧対策を通じて進められる高速炉内の観察技術や保守・補修技術の開発成果は、今後の実証炉及び実用炉の設計、保守・補修に活かせるデータとして貴重である。

以上の結果より、「常陽」を再起動することが妥当であることを確認した。

（２）要望・提言

「常陽」の再起動にあたっては、原子力機構に対して以下を要望・提言する。

- （i）「常陽」が我が国の FBR 開発のみならず、国際的な原子力システム開発においても必要不可欠な施設であることから、「常陽」の運転が早期に再開されるよう経営努力を行うとともに、関係機関はもちろんのこと、地域、国民に対しても今回のトラブル、復旧に向けた対策及び今後の FBR 開発における役割等に関する説明責任を果たしていくこと
- （ii）停止が長引くことによる FBR 開発への影響のみならず、社会・地元・職員等への影響を考え、原子力機構全体の事業計画を踏まえつつ、十分な安全確保対策を講じた上で、干渉物対策を効率的に早期に完遂するよう更に努力すること
- （iii）「常陽」の再起動後の運用にあたっては、実験炉である特長を活かして、迅速かつ信頼性の高い設計基礎・基盤データの継続的な提供が重要であり、これらの基礎データと工学規模での経験を踏まえた研究成果を、将来の FBR 設計に有効に活用できる生産性の高い実験炉となるように取り組むとともに、公募研究や施設共用等の外部資金導入方策についても今後検討すること

緒 言

高速実験炉「常陽」は、FBR 燃料・材料開発のための照射試験、炉心やプラント特性等の基礎データ取得、運転技術の蓄積や技術者養成、FBR 実用化のための革新技术開発並びに国内外への高速中性子照射場の提供等の重要な役割を担ってきた。この 30 年にわたる FBR 開発における「常陽」の成果は海外からも高く評価され、2006 年に米国原子力学会よりランドマーク賞を受賞している。

しかしながら、2007 年 5 月 14 日に MK-III 炉心第 6 サイクル運転の終了に伴い原子炉を停止した後、照射試験が終了した計測線付実験装置（以下、「MARICO-2」という。）の保持部と試料部の切り離し作業を実施した際に、試料部の切り離しに失敗し、本装置と回転プラグの干渉による燃料交換機能の一部阻害が確認され、その後の炉内観察により、炉心上部機構（以下、「UCS」という。）下面の損傷が明らかとなった。

「常陽」を再起動するためには、燃料交換機能の一部阻害の復旧や炉心上部機構の補修・交換等の対策が必要であることから、「常陽」再起動に向けた復旧方法と計画の妥当性及び再起動の必要性、再起動後の「常陽」の効果的な利用について以下の観点を踏まえて検討するため、原子力機構に各界の有識者から構成される「「常陽」利用検討委員会」が 2008 年 12 月に設置された。

- ・ FBR サイクルの実用化研究開発等に向けた国産技術開発と「常陽」の役割
- ・ FBR 開発に係る国際協力における「常陽」の位置付け
- ・ 「常陽」における研究者、技術者の育成
- ・ 「もんじゅ」再起動後の研究開発等の役割分担

本報告書は、「常陽」利用検討委員会での検討結果を取りまとめたものである。

1. 炉内干渉物対策について

1.1 炉内干渉物の発生経緯

「常陽」では 2007 年 5 月 15 日より第 15 回施設定期検査が開始された。5 月 28 日から 6 月 1 日の間に、照射試験が終了した計測線付実験装置（MARICO-2：図 1.1-1 参照）を炉心第 3 列の照射位置（炉心アドレス：3E3）から炉内燃料貯蔵ラック（以下、「炉内ラック」という。）R16 に移動し、MARICO-2 の保持部と試料部の切離作業が実施された。その後、6 月 11 日に回転プラグに燃料交換機を取り付け、回転プラグを基準位置で下降させた際に、燃料交換機の新ホールドダウン軸に荷重異常が発生し、調査のために炉内観察が実施された。炉内干渉物対策の経緯を図 1.1-2 に示す。

集合体頂部等の観察結果及び UCS 下面の観察結果を図 1.1-3 に示す。これらの観察により、MARICO-2 試料部と保持部が接続された状態で回転プラグを操作した結果、MARICO-2 試料部が炉内ラック上に突き出た状態で変形し、炉内干渉物となっていることが確認された。さらに、炉内干渉物との接触により UCS 下面の整流板が破損・変形していることが判明した（事象進展：図 1.1-4 参照）。なお、試料部ハンドリングヘッドは MARICO-2 保持部に保持されていることが確認された。

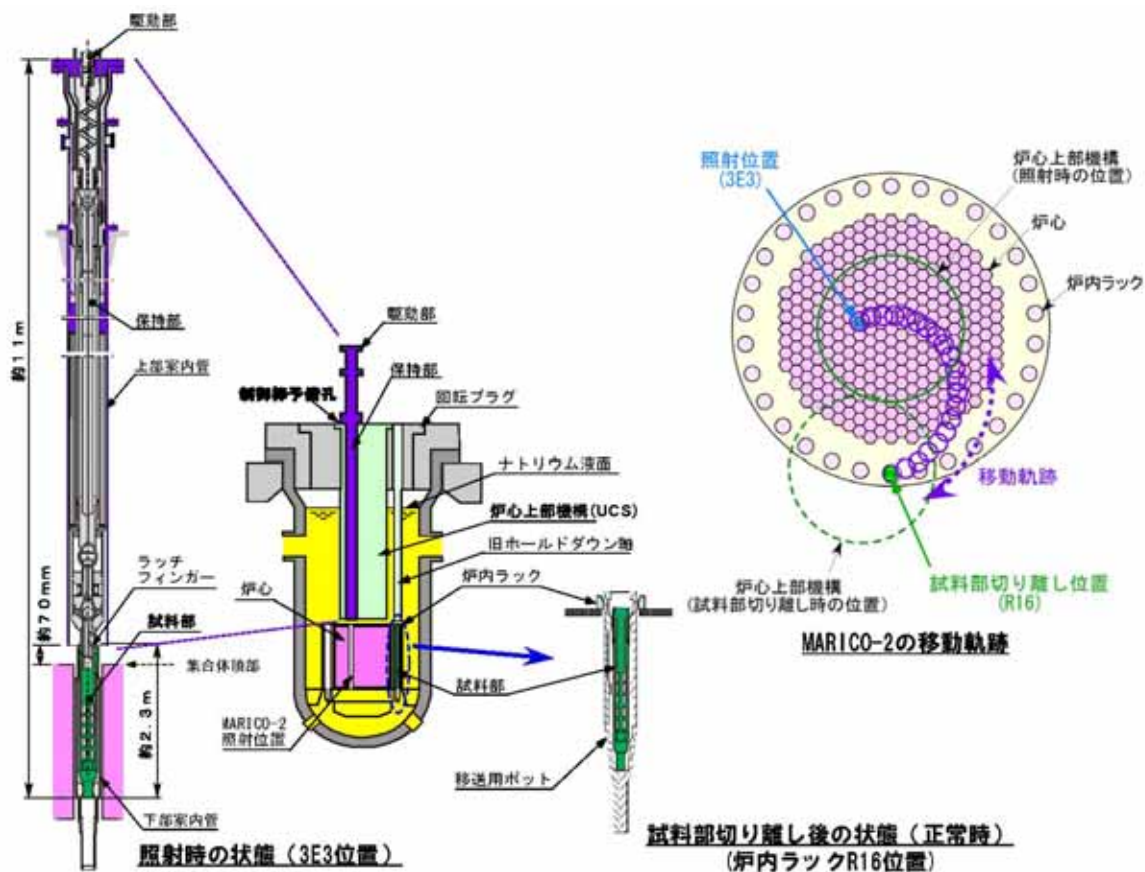


図 1.1-1 計測線付実験装置（MARICO-2）と試料部切り離し作業の概要

H19年								H20年								
5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
▼第6' サイクル終了 (5/14)																
▼燃料交換機ホールドダウン軸荷重異常発生 (6/11)																
▼燃料交換機新ホールドダウン軸下面に圧痕を確認 (6/19)																
既存の観察装置等による炉内観察																
▼炉内ラックR16上に干渉物を確認 (9/11)																
新規に製作したファイバースコープ等による詳細観察																
▼炉内干渉物がMARICO-2であることを確認 (10/10)																
▼法令報告 (11/9)																
集合体頂部等の詳細観察																
UCS下面観察装置の設計・製作																
モックアップ試験																
UCS下面観察																
法令報告 (9/1) ▼																

図 1.1-2 炉内干渉物対策の経緯

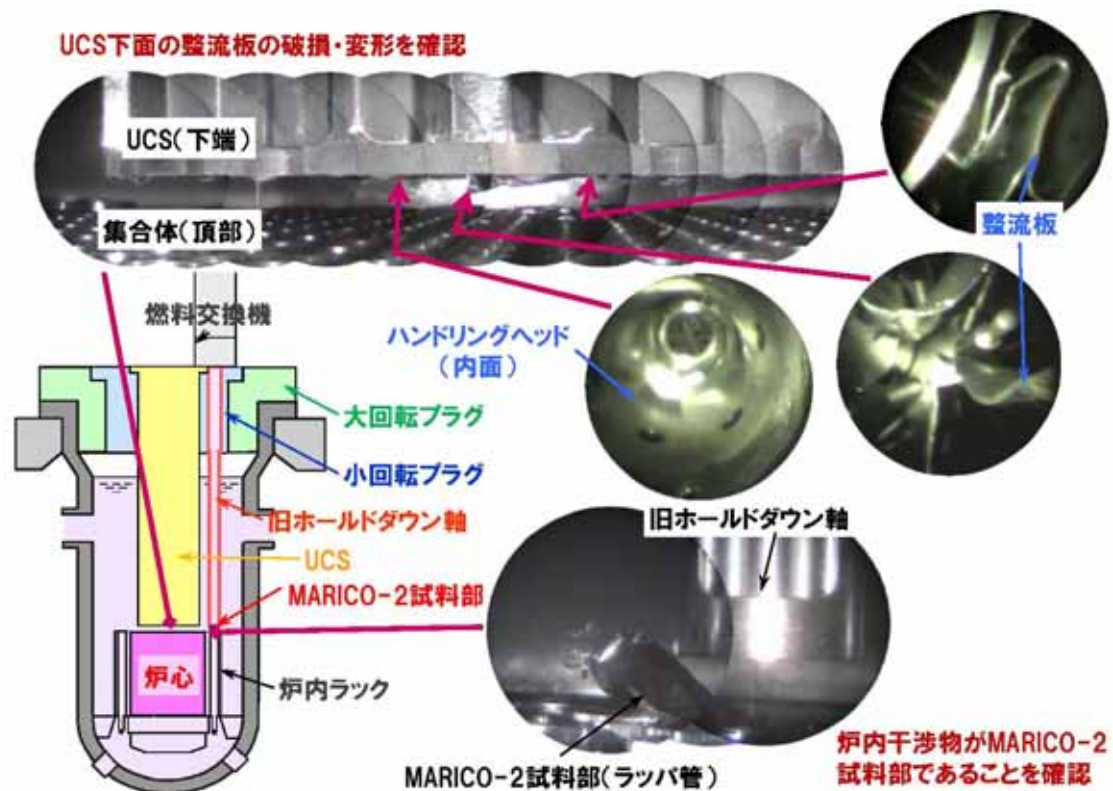
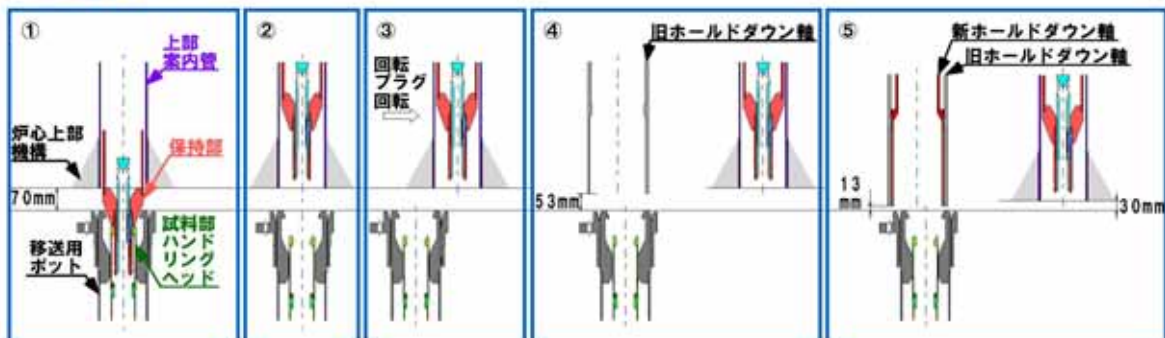


図 1.1-3 主な炉内観察結果

<正常時>



<今回の作業>

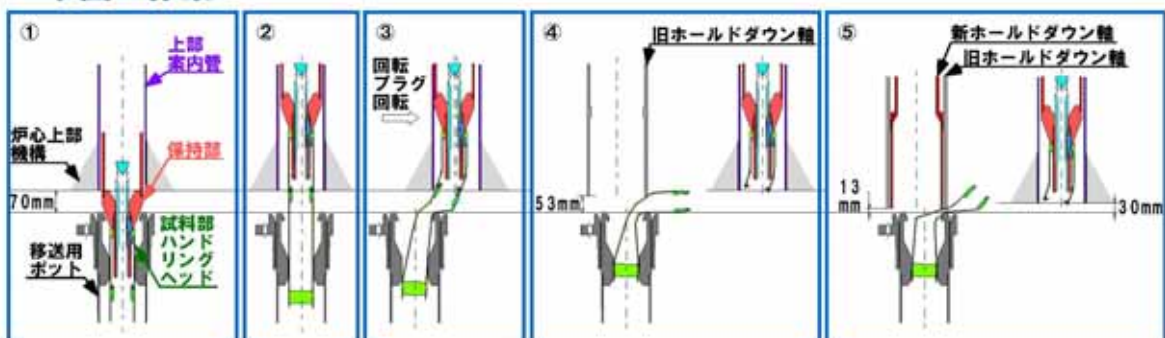


図 1.1-4 試料部切離作業時の事象進展

1.2 「常陽」再起動に向けた復旧方法と計画

「常陽」の再起動に向けた復旧方法・計画に関する原子力機構からの説明を受け、以下の3項目について議論し、再起動の妥当性を確認した。なお、根本原因分析等により、今回のトラブルの原因・教訓、再発防止対策を十分検討し、原子力機構内で適切に情報が共有されることを要望する。

1.2.1 再起動に向けた復旧方法

「常陽」を再起動するためには、炉内干渉物となっている MARICO-2 試料部の回収と、整流板等が変形した UCS の復旧が必要である。UCS の復旧方法として、UCS の交換と補修について比較検討した。それぞれの概要を図 1.2-1 及び 1.2-2、両者の比較を図 1.2-3 に示す。なお、MARICO-2 試料部については、どちらの復旧方法にあっても、UCS を一時撤去した孔を利用して回収する計画である。

UCS を交換する場合、ナトリウムが付着した放射性廃棄物の保管が課題となるが、「常陽」では MK-III 冷却系改造工事において主中間熱交換器を交換した実績が有り、これに基づいて既設 UCS の保管方法が検討されている。一方、UCS を補修する場合、UCS の放射化量が大きいことから、遮へいセルと変形した整流板等を遠隔補修・検査する技術開発が必要となる。また、作業スペース等を考慮すると、遮へいセルを設置するための建家が新たに必要となり、場所の確保、費用と期間の問題とともに、設置のための許認可も必要となる。さらに、蒸着したナトリウムによる抵抗力により、引き抜いた UCS に損傷が生じ、再利用できない可能性も否定できない。

以上のように、UCS を補修する場合には交換する場合に比べて、遠隔装置の開発及び遮へいセルの設置等に伴い、費用が数十億円程度、期間についても数年程度増加することが想定されることから、UCS を交換することにより復旧する計画である。

図 1.2-4 に示すように、海外でも同様なトラブルを経験し、それを克服して運転を再開している。「常陽」においてもこれらの実績を参考とし、「常陽」におけるこれまでの保守経験を踏まえて UCS 交換に係る技術開発を進め、交換工事に伴うトラブルが生じないよう十分な安全対策および品質管理を講じた上で、できるだけ早期に工事を完了して再起動することが肝要である。これらの作業にあたっては、外部への安全上のリスクが生じないよう、十分な対策を講じることが重要であり、放射性物質等の放散防止策、監視等が実施される計画であることを確認した。

1.2.2 再起動に向けた復旧計画

原子力機構における「常陽」の再起動計画（目標）は図 1.2-5 に示すように

2012 年度とされている。今後、(1)費用対効果、(2)時間、(3)交換・補修による技術的な成果や新 UCS 設備の機能向上についてさらに検討するとともに、復旧作業を効率的に早期に完遂するよう要望した。

1.2.3 炉内観察・復旧により得られる技術的成果

FBR の冷却材である液体金属ナトリウムは、原子炉停止時においても約 200℃の高温で管理され、化学的に活性であることから、ナトリウム液面上部にはカバーガスとしてアルゴンガスを充填し、原子炉容器上部には遮へい及びカバーガスの気密性を確保するための遮へいプラグ（以下、「回転プラグ」という。）が設置されている。このため、原子炉容器内への観察・回収装置の挿入は、回転プラグに設けた貫通孔から気密性を確保した状態で実施する必要がある。さらに、これらの装置には耐放射線性と耐熱性が要求される。

UCS の交換、MARICO-2 試料部の回収作業を通じて、これまで FBR において経験が少なかった遠隔操作を含む炉内観察技術の高度化、高放射線・高温環境下で使用可能なファイバースコープ等の炉内観察システムの開発、変形した集合体等の回収技術等を蓄積することが可能である。

上記技術は今後の FBR 開発に重要な技術であり、実証炉・実用炉の設計に活かせる FBR の炉内保守・補修技術のベースとなる知見を得ることができる。また、これらの技術開発に加え、撤去した既設 UCS は約 30 年間の使用実績を有し、実機環境下での炉内構造物材料特性を把握する上で貴重な素材であることから、照射試料として有効活用し、今後の研究開発に資するよう要望した。

既設のUCSを撤去し、その貫通孔からMARICO-2試料部を回収した後、新規UCSを装荷

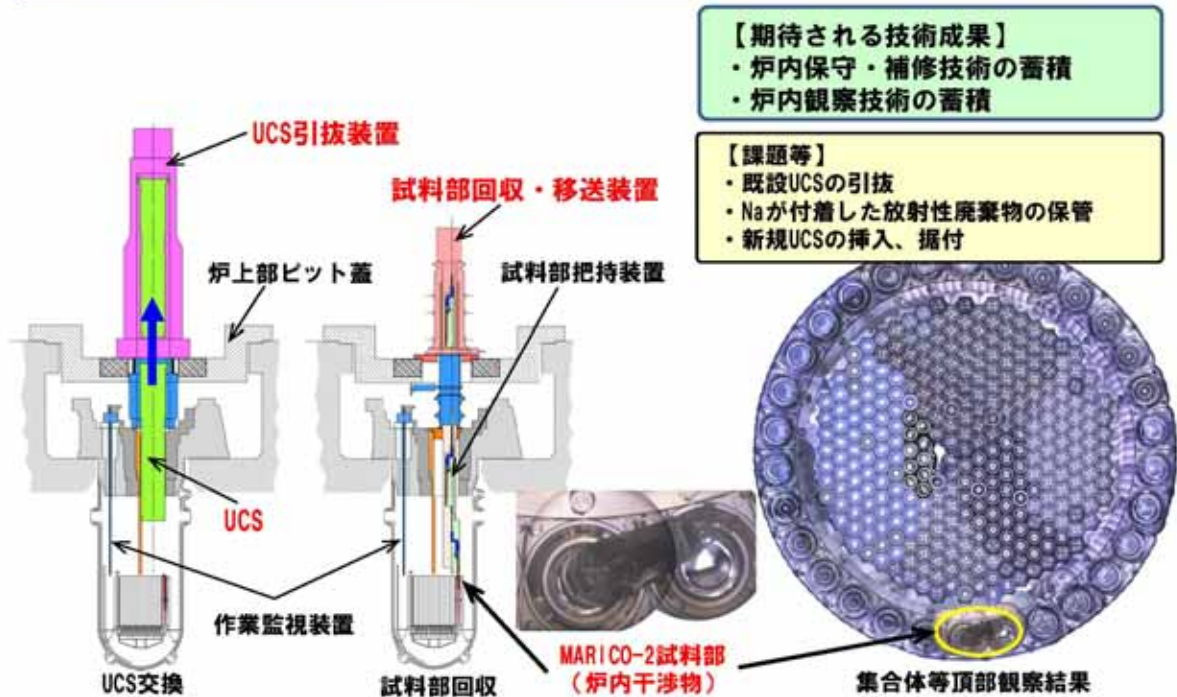


図 1.2-1 UCS 交換と MARICO-2 試料部の回収について

UCSを引き抜き、遮へいセル内で遠隔補修し、再装荷
(UCSを引き抜いた貫通孔からMARICO-2試料部を回収)

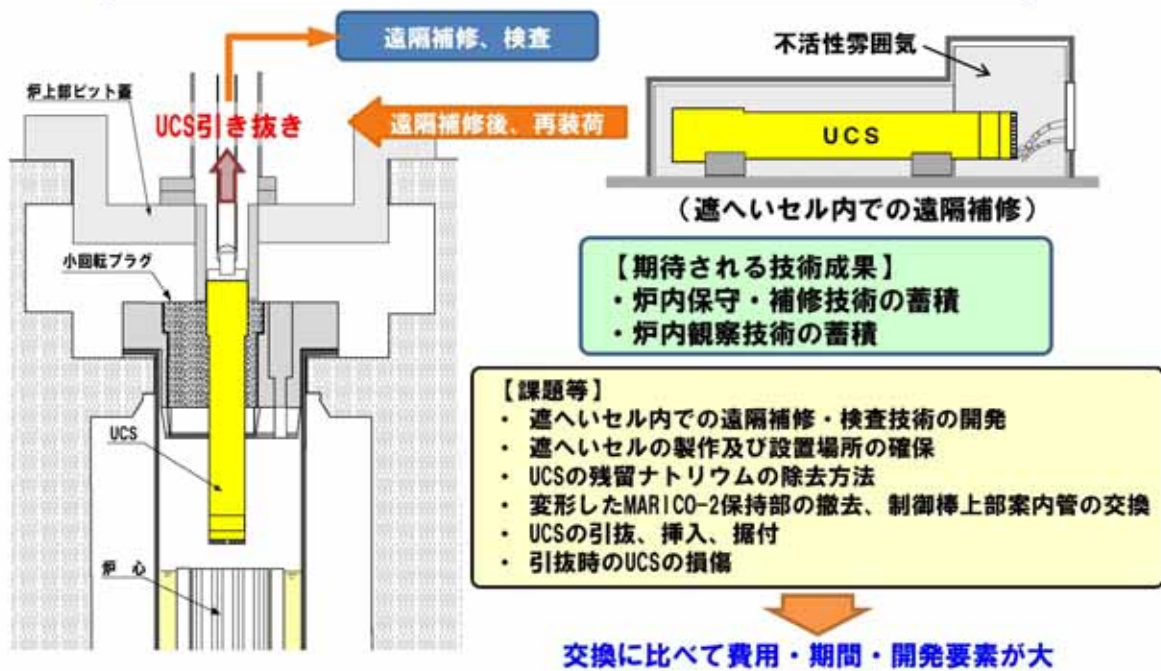


図 1.2-2 UCS の補修について

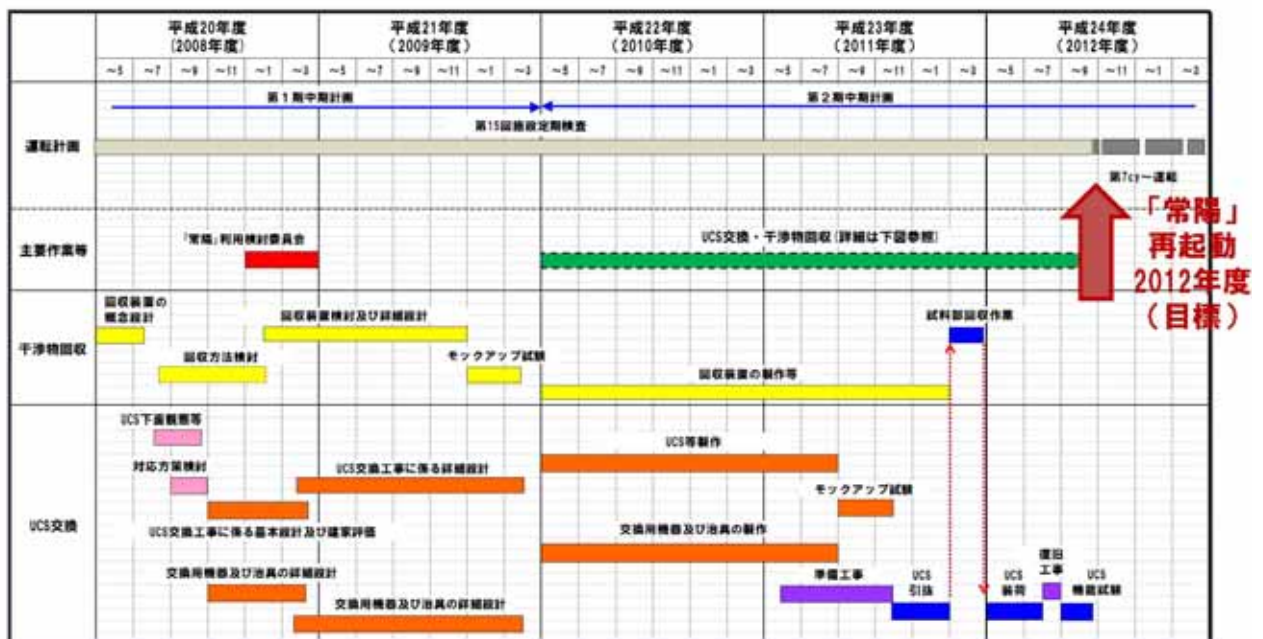
	課 題
UCSの交換	・ 既設UCSの引抜 ・ ナトリウムが付着した放射性廃棄物の保管 ・ 新規UCSの挿入、据付
UCSの補修	・ 遠隔補修、検査技術開発 ・ 遮へいセルの製作、設置 ・ UCSの残留ナトリウムの除去方法 ・ MARICO-2保持部の撤去、制御棒上部案内管の交換 ・ UCSの引抜、引抜時のUCSの損傷 ・ 補修後のUCSの挿入、据付

「UCS補修」は「UCS交換」と比較して
費用（数十億円の増加）・期間（数年の増加）・開発要素が大
「常陽」運転再開は、「UCS交換」により対応

図 1.2-3 UCS の交換と補修の比較

炉	炉内観察・補修等の実績（例）
ラブソディ （仏）	炉内の制御設備用プラグに設置された熱電対の破損、熱電対装填管のナトリウム腐食が見られたため、1976～1977年に制御設備用プラグの交換を実施。
フェニックス （仏）	寿命延長プログラム（1998～2003年）の中で炉内観察等を実施。
EBR-II （米）	炉内で湾曲した集合体の回収（1979年）や落下した集合体の回収（1982年）を実施。
FBTR （印）	1987年、回転プラグ運転時に燃料取扱機の延長管と一部集合体に変形。ペリスコープ等を用いた炉内観察、変形した延長管の切断・交換を実施。

図 1.2-4 海外 FBR における炉内観察・補修等の実績



「常陽」を2012年度に再起動することで、
 FaCT7'ロシエ外に必要な照射試験への影響を小さく抑えられる
 <今後、期間(約3年半)短縮・予算(約35億円)低減のため、更に努力する>

図 1.2-5 原子力機構による「常陽」の再起動計画(目標)

2. 「常陽」の役割と今後の必要性

2.1 我が国の FBR 開発における「常陽」の位置付け

FBR 開発は、我が国の国家基幹技術の一つとして位置付けられ、添付-3 に示す 2005 年に原子力委員会が策定した「原子力政策大綱」、2006 年に文部科学省がとりまとめた「高速増殖炉サイクルの研究開発方針について」に記載されているように、FBR の国産開発を目標として、産・官・学の総力を結集し、その研究開発が進められている。FBR 実用化に向けた開発ステップを図 2.1-1 に示す。「常陽」は 1966 年に原子力委員会が策定した「動力炉開発の基本方針」（添付-3 参照）に基づき、自主的な FBR 開発の効率的推進を図ることを目的として、FBR 開発計画の第 1 段階にあたる実験炉及び高速中性子照射炉として建設された。「常陽」は日本初のナトリウム冷却型高速炉であり、MK-I 炉心は増殖性能の実証を含め、原型炉の設計等のための技術的経験の取得・蓄積を、MK-II、III 炉心は照射炉として FBR の技術的経験の取得・蓄積及び燃料・材料照射試験の実施を主な目的としている（図 2.1-2、2.1-3 参照）。なお、MK-III 炉心は FBR 実用化のための燃料・材料開発における目標照射量（ペレット最高燃焼度：～25 万 MWd/t、原子弾き出し数：～250 dpa）を踏まえ、中性子束密度の増加と照射場の拡大等を図り、照射性能を向上したものである。

また、原子力政策大綱等にも記載されているように、「常陽」には、FBR 用燃料・材料等の開発のための照射試験のみならず、革新技术の実機プラントでの実証、技術者養成、教育研修等の場としての活用も求められている。

FBR 開発において、「常陽」が高速実験炉・高速中性子照射炉として、これまで果たしてきた役割と今後期待される役割の概要を図 2.1-4、2.1-5 に示す。今後の FBR 開発における「常陽」の主な役割は、高速中性子照射炉として FaCT プロジェクト関連の照射試験に代表される安全性・経済性向上を目的とした照射試験を実施することである。また、これらの照射データの取得を通じて運転・許認可実績を蓄積し、プラント安全性向上、新技术実証、技術伝承等に寄与していくことも重要である。

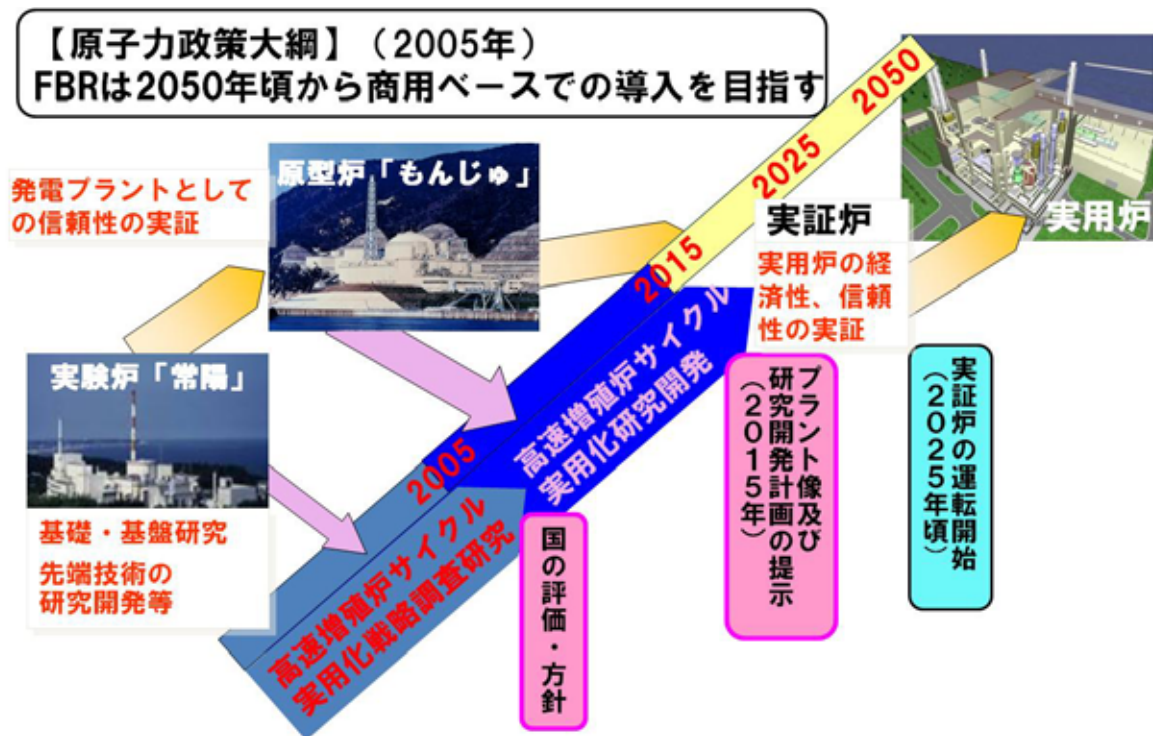


図 2.1-1 FBR 実用化の開発ステップ



図 2.1-2 「常陽」及び大洗研究開発センターの施設群

1977年 4月 ～1981年12月	MK-I 炉心	・・・ プルトニウムの増殖性を確認するための増殖炉心
1982年11月 ～1997年 9月	MK-II 炉心	・・・ FBR燃料・材料の照射試験用炉心
1997年12月 ～2000年 5月	移行炉心	・・・ 炉心を徐々に拡大して MK-III 炉心（高性能照射用炉心）に移行
2003年 7月～	MK-III 炉心	・・・ FBR実用化に向けた研究開発の加速と外部利用の拡大

積算運転時間	約 7万1千 時間	積算熱出力	約 62億4千万 kWh
燃料集合体の照射実績	MK-I 燃料集合体 116体 MK-II 燃料集合体 342体 MK-III 燃料集合体 130体	試験用集合体の照射実績	照射燃料集合体 27体 材料照射用反射体 68体 材料照射装置 5体 自己作動型炉停止機構 実験装置 1体

(2009年4月現在)

図 2.1-3 「常陽」の運転実績

① 成果

- ・ 増殖性能の実証（MK-I 炉心）
- ・ ナトリウム技術の確立
（運転・保守・保全技術の蓄積、MK-III 改造工事）
- ・ 核燃料サイクルの輪の実証
- ・ 基礎的な安全性の確認（自然循環、燃料破損模擬試験）
- ・ 安全、確実な運転（炉心・燃料の設計・管理の実証）

② 今後の役割

- ・ プラント安全性向上（固有安全性実証試験）
- ・ 新技術実証
（自己作動型炉停止機構、レーザによる破損燃料の同定）
- ・ 先進的・革新的プラント計測技術開発
（光ファイバを用いた高速炉プラント構造健全性監視技術）
- ・ 新材料の実機使用実績蓄積（316FR鋼、高Ni鋼）
- ・ FBR技術の伝承、人材育成

図 2.1-4 実験炉としての「常陽」の役割

目的	MK-II炉心までの実績	MK-III炉心の役割
実証炉	既存技術の高度化・大型化	革新技術導入、軽水炉に比肩する経済性達成
	MOX燃料（軸非均質、中空） 改良オーステナイト銅被覆管の照射 限界性能の確認（PTM等）	ODS銅被覆管、簡素化ペレットの照射 MA-MOX燃料（副概念：金属燃料） 限界性能の確認（PTM, RTCB等） 規格・基準類作成のためのデータ取得
「もんじゅ」	現行炉心の確認	高度化炉心の先行照射
	改良オーステナイト銅 低密度ペレットの照射	ODS銅、高密度中空ペレット 長寿命制御棒の照射
国際協力	2国間協力	日本主導の国際協力へ
	日米、日仏協力による試験	Gen-IV、GNEP等の国際協力のツールとして活用
基礎基盤	FBR実用化のための技術開発及び基礎・基盤データ取得	
	炉心核特性評価手法の高度化・標準化、燃料設計手法の高度化	
外部利用	依頼に基づく対応	利用の拡大
	材料の照射挙動に関する基礎研究	軽水炉、ガス炉、核融合炉等の多目的利用

図 2.1-5 照射炉としての「常陽」の役割

2.2 「常陽」の技術的特長

FBR 開発には、広範な種類及び照射条件での燃料・材料の照射試験、燃料溶融等の限界照射等に対応できる高速中性子照射炉と照射後試験施設が必要である。また、我が国が高速中性子照射炉を有することは、大学からの受託照射（核融合炉材料の照射試験等）等を容易とし、基礎基盤技術開発を発展・活性化するとともに、将来を担う技術者養成・教育研修の場を提供することを可能とする。

「常陽」はこれらの要件を踏まえた上で、高速中性子照射炉として以下の技術的特長を有するとともに、国際協力に貢献できる数少ない高速中性子照射炉である。現在運転中の世界の高速炉の仕様・特長を比較して図 2.2-1 に示す。このうち、フェニックス（仏国）は 2009 年に運転を終了する予定であるため、現在、高速中性子照射場として利用可能な高速炉は、「常陽」、BOR-60（露国）、BN-600（露国）となり、「常陽」は我が国が FBR の安全利用をはじめ、FBR 利用技術に係る原子力先進国として、主導的な役割を担うための重要な研究施設である。

(1) 世界最高レベルの高速中性子束

世界の試験研究炉の全中性子束、高速中性子束を比較した結果を図 2.2-2 に示す。「常陽」は世界的にも最高レベルの高速中性子束を有する貴重な施設である。燃料・材料開発においては、多種多様な仕様及び条件下での照射データを取得することが重要であり、世界最高レベルの高速中性子束は燃料・材料の照射試験期間を短縮し、開発を加速することで、より多くの照射データの取得を可能とする。

(2) 高品質な照射データ

燃料・材料開発においては、照射データの質を担保することも重要である。高品質な照射データは燃料・材料の適切な設計仕様の設定を可能とし、安全性・経済性を向上させることができる。「常陽」では、これまでに照射場の特性を把握するため、炉内の中性子束・温度の測定手法が確立され、取得した実測データに基づいて高度化した核熱計算法が整備されており、これに基づき高品質な照射データが提供されている（図 2.2-3 参照）。

(3) 世界に類のない照射試験技術

燃料・材料開発を推進するためには、広範な種類の燃料・材料を多種多様な条件で照射し、データを取得することが重要である。「常陽」では多種多様な照射試験に対応するため照射試験技術を高度化しており、照射実績の少ない燃料・材料や通常運転を超える条件を模擬した照射試験を、要求された照射条件において安全かつ高精度で実施することができる。これまでも、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の限界性能を確認するための燃料溶融限界出力試験

等を実施し、設計裕度の把握、燃料温度評価手法の高度化を図った実績がある。さらに、照射中の材料の温度を精度良く制御可能なオンライン照射試験装置が開発されている。(図 2.2-4 参照)。

(4) 最先端の照射後試験技術

「常陽」には照射後試験施設が隣接しており、破壊・非破壊の照射後試験が実施できる他、照射試料の炉内への再装荷が可能である。さらに、世界で唯一、照射済集合体の非破壊試験に適用可能な X 線 CT 装置が開発・整備されている。この装置により、照射後、迅速に多量のデータを取得でき、これまで得られなかった長期照射試験の中間データの取得が可能であるため、効率的な燃料・材料開発の推進に資することができる(図 2.2-5 参照)。

(5) 実験炉としての柔軟な運用

実験炉である「常陽」は、照射試験目的に合わせて運転時間や原子炉出力等が柔軟に設定でき、燃料・材料照射挙動メカニズム解明のための照射試験、新技術の実証、炉心・プラント安全性向上等を目的とした事象メカニズムの解明等、FBR の研究開発に資するデータの提供が可能である。

また、「常陽」は高速中性子照射炉としての役割に加え、高速実験炉としての所期の目的の一つである自主技術によるナトリウム冷却型 FBR の設計・建設・運転に係る技術的経験を蓄積する役割を有する。長年の運転・保守実績に基づく「常陽」で蓄積される技術的経験は、FBR 技術を体系的に確立するにあたり貴重なデータとなる。特に、MK-III 計画において主中間熱交換器に使用した 316FR 鋼等の新材料の実機使用実績は、今後の実証炉・実用炉において安全性を担保し、国民の理解を得るために重要な技術的実績となる。

原子炉		原子炉熱出力 (MWt)	高速中性子束 ($\times 10^{15}$ n/cm ² s)	稼働率 (%)	原子弾き出し数 (dpa/年)	主要な照射試験	照射後試験施設
照射炉	「常陽」 (日)	140	4.0	55	33	燃料・材料・MA・LLFP照射 (多数の温度設定) 密封キャプセル内照射 限界照射 オンライン計測・制御照射	燃料集合体、燃料、 材料の照射後試験 施設が隣接
	BOR-60 (露)	60	2.2	73	25	燃料・材料・LLFP照射 (単一の温度設定) 液体金属(鉛等)ループ照射 限界照射 オンライン計測・制御照射	燃料集合体、燃料、 材料の照射後試験 施設が隣接
原型炉(発電炉)	「もんじゅ」 (日)	714	3.7	67	32	今後計画(照射試験(GACID等)、照射装置、 関連試験施設の設計・許認可・建設/製作が必要)	
	BN-600 (露)	1470	4.0	~70	~36	材料照射のみ	燃料集合体の解体・ 検査施設が併設
	フェニックス* (仏)	350	2.6	~70	~22	燃料・材料・MA・LLFP照射 (単一の温度設定) 限界照射(EOL試験)	燃料集合体の解体・ 検査施設が併設

* 2009年運転停止予定

図 2.2-1 主要な高速炉の比較

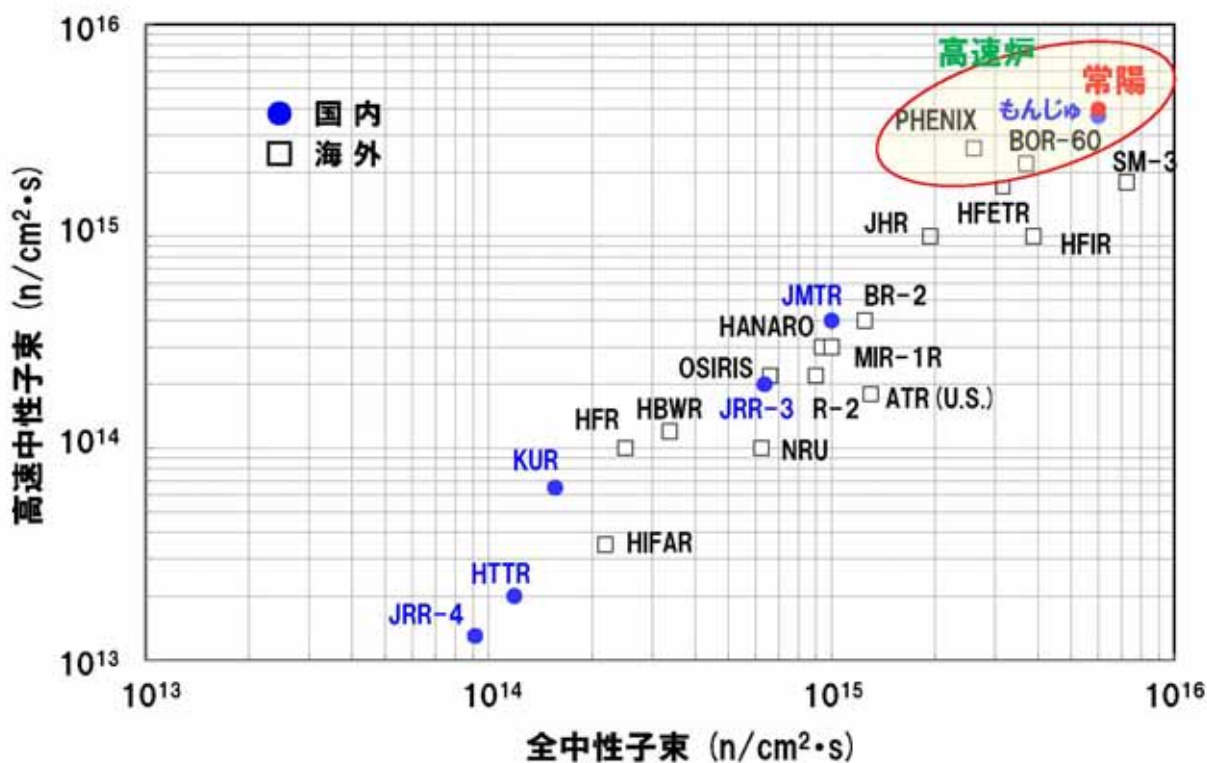


図 2.2-2 主要な中性子照射場の比較

- ・ 照射場特性の把握を目的とした核熱特性試験を実施
- ・ 蓄積した核熱特性試験データに基づき計算法を高度化



高精度な照射試験が実施可能

評価項目	評価精度	目的・対象
線出力密度・燃焼率	3～5%	燃料開発 MOX燃料 MA含有燃料 金属燃料 等
原子弾き出し数 (dpa) ヘリウム生成量	5～10%	材料開発 炉心材料 構造材料 制御棒材料 核融合材料 等
照射温度 (ΔT) ※	10%	核変換 技術開発
核変換率	10%	マイナーアクチニド 長寿命核分裂生成物
照射温度 (ΔT) ※	10%	

※ ΔT : 原子炉入口冷却材温度 (350℃) からの増分

図 2.2-3 高精度な照射条件の評価

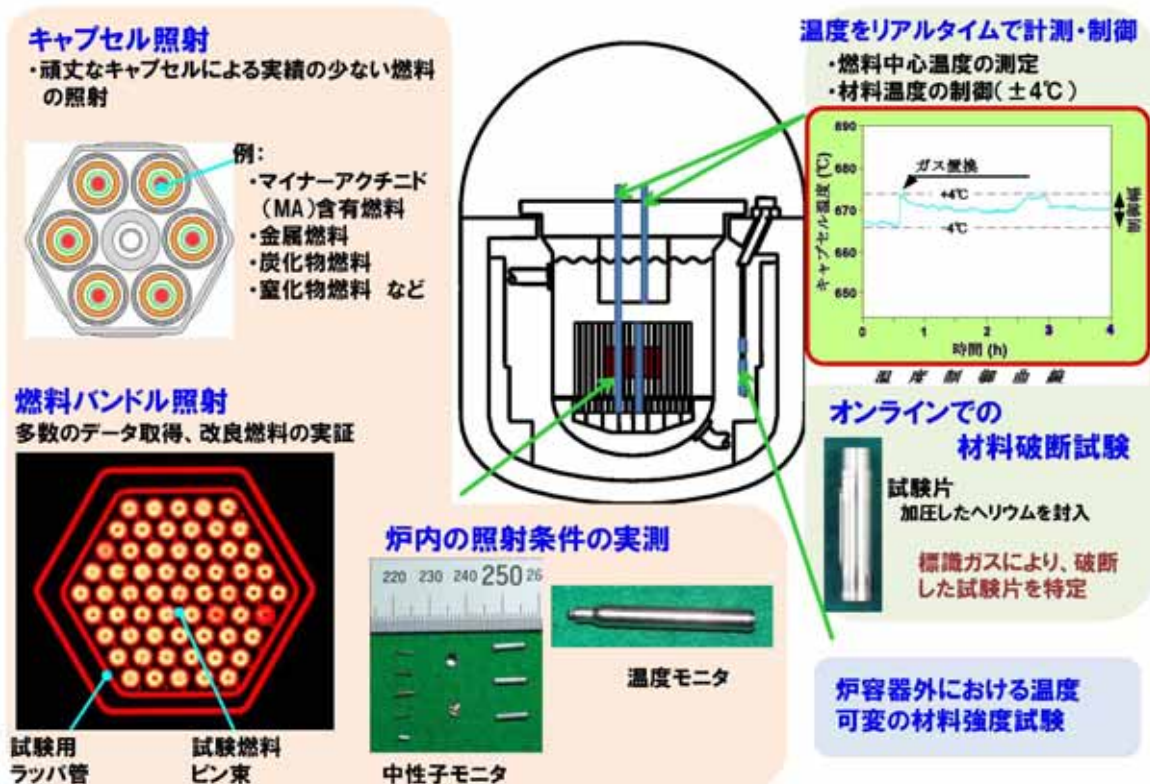


図 2.2-4 多種多様な照射試験に対応した照射技術の高度化の例

世界で唯一、X線CT技術を照射済集合体の非破壊試験に適用
 → 照射後、迅速に多量のデータを取得
 → これまで得られなかった長期照射試験の中間データを取得

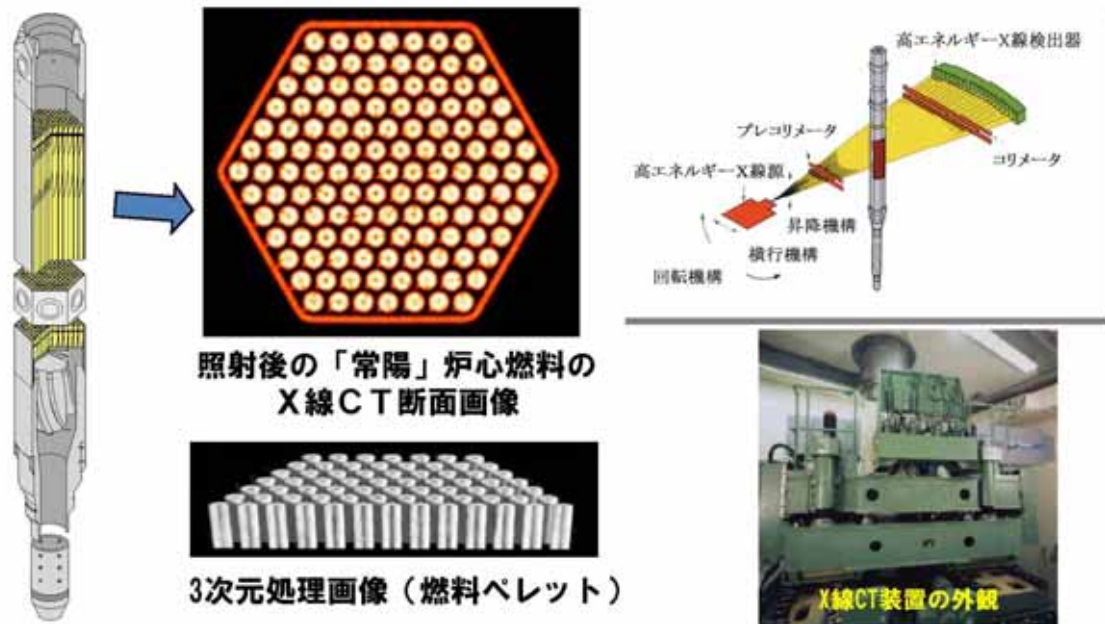


図 2.2-5 最先端の照射後試験技術

2.3 国内での照射データ取得の意義

これまでの我が国における FBR 開発の実績を踏まえ、今後の開発においても、我が国の優秀な FBR 技術を自主技術として発展させていくことが、将来のエネルギー確保の観点から重要である。特に、燃料・材料開発は FBR を実用化する上で最重要課題の一つである（図 2.3-1 参照）。燃料・材料開発においては、その健全性を確保するとともに、経済性向上の観点で高燃焼度化による燃料費低減を達成し、かつ、燃料製造技術との調和が図られることが求められる。燃料・材料開発に係る国内でのデータ取得体制を図 2.3-2 に示す。燃料のふるまいと製造実績との関連研究は「常陽」、将来的には「もんじゅ」を加えた国内での照射試験によって照射データを取得することで推進される。

FBR は軽水炉よりも炉心燃料寿命を長期化しやすい核的な特長を有するが、一方で、高中性子束、高出力密度、高燃焼度、高温ナトリウム環境等の厳しい環境で使用されることから、実機の高速炉で取得される照射データは極めて重要である。国内でこれらの照射データを取得するメリットを以下に示す。

- ・ 「常陽」の照射性能を活かした質・量ともに充実したデータ
「常陽」では合理的な裕度の設定や経済的整合性を有する信頼性の確保等に必要な精緻な評価が可能
- ・ 多量データの合理的な取得と負担軽減
多種多様な照射条件で、多量のデータを取得していくには、国内照射・国内データ取得が輸送負担・費用負担の軽減の面でも適切
- ・ FBR 開発の計画的な推進と時間的な即応性
エネルギー資源確保に向けた燃料開発から照射後試験までの研究開発を我が国主導で実施可能であり、また、革新技術等に係る照射試験をタイムリーに実施し、必要な照射データを隣接する照射後試験施設で取得可能
- ・ 国内技術の向上・蓄積
国内で燃料・材料の製造、照射、照射後試験を実施することは、国内の技術者育成に寄与
- ・ 燃料の製造技術関連データの保護
日本独自の技術で製造した燃料を国内で試験することにより、詳細なノウハウの流出を防止

国内で照射データが取得できなくなり、海外炉を利用して照射データを取得する場合、照射炉の所有国の原子力や外交上の政策の影響、コストの増加等のリスクがあり、国外への燃料輸送の問題や、照射試験の自由度への制約等の課題により、我が国の FBR 開発に必要な照射データを計画どおりに取得できない可能性がある。また、2.5.4 で後述するように、「常陽」は我が国が有する FBR 開発の貴重な研究施設であり、「常陽」で得られる精度の良い照射データや革新的な技術の検証結果

に寄せる国際的な期待も大きい。

このため、国内で照射データを取得できる体制を整備・保持することは、FBR 開発において重要であると考え。高速中性子照射炉として優れた特長を有する「常陽」を失った場合、国内で照射データを取得するメリットである「FBR 開発の計画的な推進と時間的な即応性」、「国内技術の向上・蓄積」等がなくなり、国家基幹技術である FBR 開発に支障が生じるとともに、FBR 開発における我が国の国際的な技術的優位性及び競争力の低下が懸念される。

また、軽水炉分野においても、安全性・経済性の更なる向上に試験研究炉が大きな役割を果たしていることを踏まえると、FBR の実用化以降も、安全性・経済性の向上のための革新技术の開発に高速中性子照射炉は重要な役割を果たしていく必要がある。

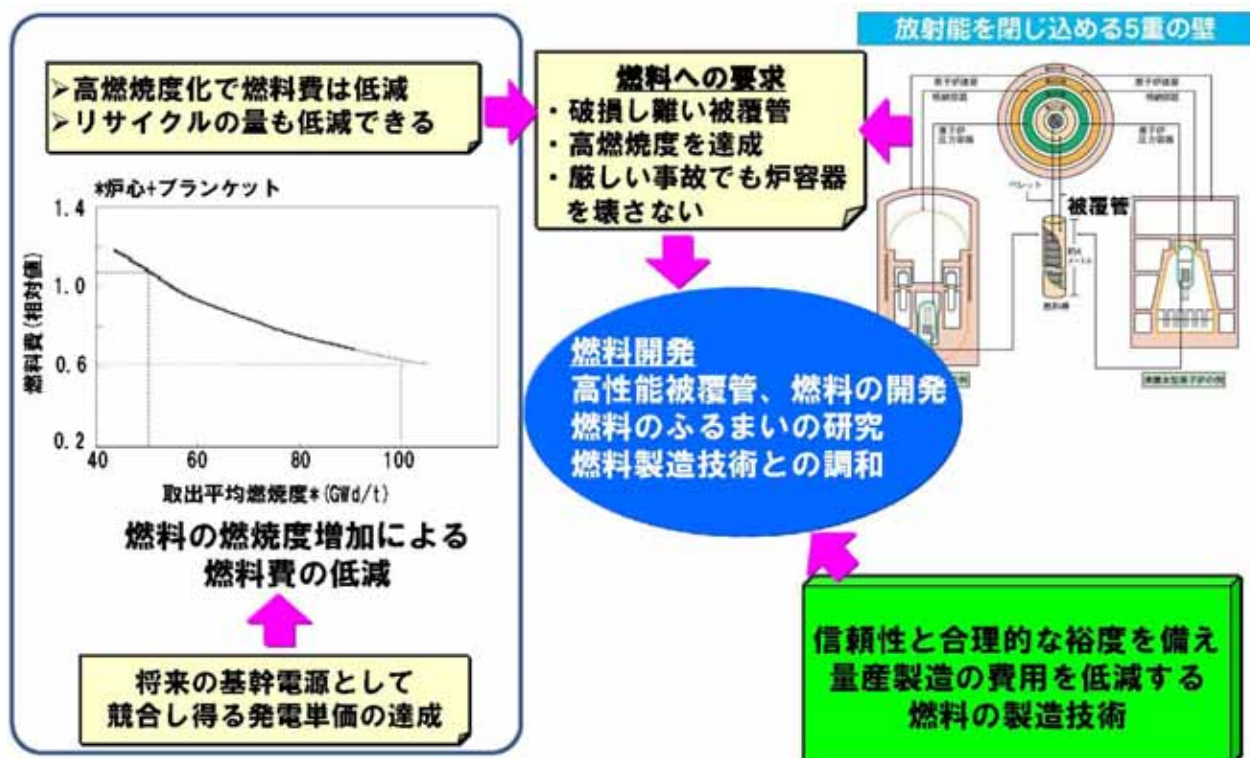


図 2.3-1 FBR の実用化に向けた燃料・材料開発の重要性

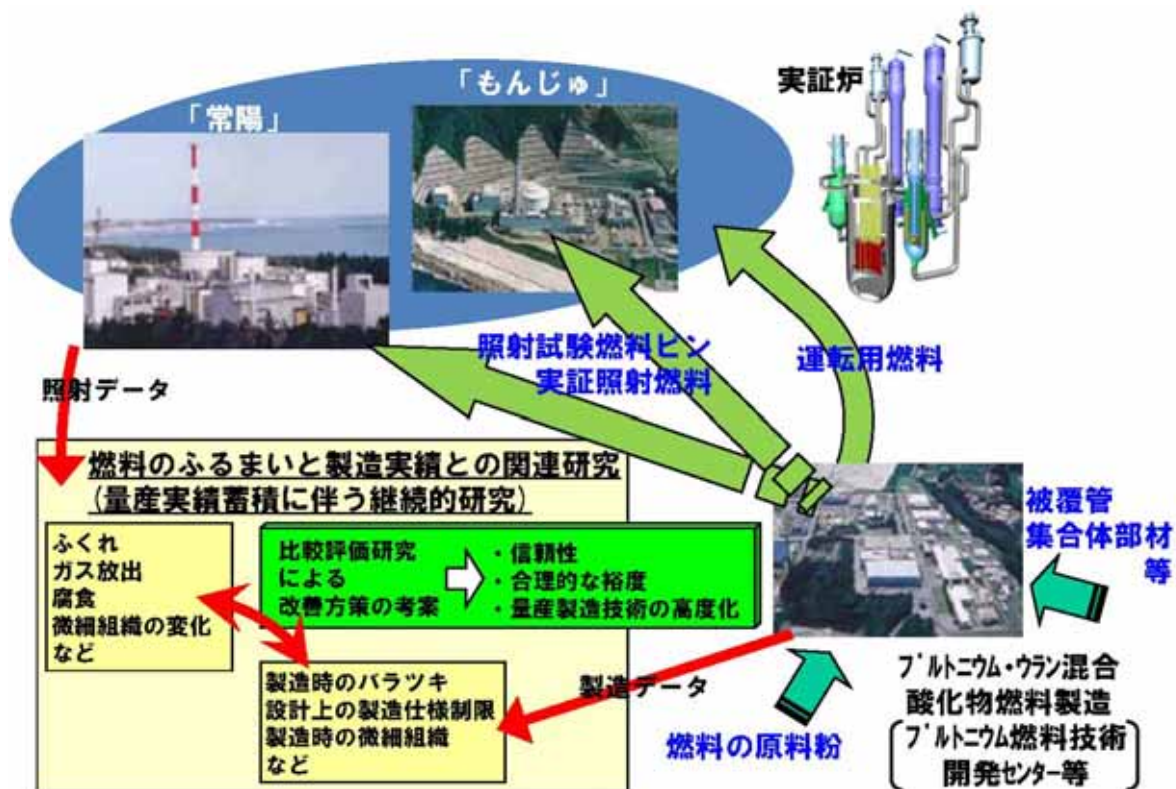


図 2.3-2 燃料・材料開発に関する国内でのデータ取得体制

2.4 「常陽」と「もんじゅ」の役割分担

「もんじゅ」は地元の了解を得つつ、原子力政策大綱にも記載されているとおり、運転を早期に再開し、原型炉として10年程度以内を目途に「発電プラントとしての信頼性の実証」と「運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立」の所期の目的を達成することを優先して取り組む計画である。その後、高速中性子を研究開発に提供できることを踏まえ、高速増殖炉の実用化に向けた研究開発の場として活用・利用することが期待されている。これに向けて、「もんじゅ」炉心の高性能化等を実施し、高速中性子照射場としての性能を確認し、機能を整備した上で、「常陽」で培われた照射技術等を「もんじゅ」に移転し、経済性・安全性の向上のための照射試験等に供する計画である。

発電プラントとしての信頼性の実証等を目的とした「もんじゅ」と比較すると、「常陽」は高速中性子照射炉として照射試験目的に応じた柔軟な運転が可能であり、照射試験に関する幅広い許認可を有している。さらに、オンラインの照射試験装置も使用した高品質な照射データも取得できる。「もんじゅ」が高速中性子照射場として確立された後も、広範な仕様の新しい燃料・材料の先行照射試験、限界照射試験及びオンラインでの照射試験により、燃料ピン及び材料試験片レベルでの基礎的な照射挙動等を「常陽」で把握した上で、集合体規模の照射試験を「もんじゅ」にて実施して性能を実証することがFBRの実用化をより効率的に推進するために重要であると考ええる。「常陽」で取得する限界照射試験等も含めた高品質な照射データは、実証炉・実用炉用の設計基準等を整備する上で有用なデータであり、「常陽」と「もんじゅ」の照射データを組み合わせることで、設計基準等の信頼性が向上し、適切な設計裕度の設定によりFBRの安全性の確保とともに経済性向上に資することができる（図2.4-1参照）。

「常陽」	「もんじゅ」
基礎的な照射挙動の把握 ➤ 燃料ピン及び試験片レベルの照射試験 ・キャプセル照射等による新型燃料・材料の先行照射試験 ・多種多様な仕様・照射条件下での照射試験 ・オンライン照射試験装置による高精度な照射試験 ・溶融限界出力試験、燃料破損限界試験	工学規模での性能の実証 ➤ 集合体規模の照射試験 ・炉心燃料・材料に関する多数のデータ取得 ・高燃焼度・低除染TRU燃料の実証 ・Np/Am/Cm含有燃料の照射（GACID計画） 研究開発の中核として位置付け、以下の所期の目的を達成する ・発電プラントとしての信頼性の実証 ・運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立 その後、高速中性子を研究開発に提供することを踏まえ、研究開発の場として活用（原子力政策大綱）

「常陽」と「もんじゅ」の照射データを組み合わせることで、設計基準等の信頼性が向上し、適切な設計裕度の設定によりFBRの合理的な安全性の確保・経済性向上が可能



FBRの実用化をより効率的に推進

図 2.4-1 高速中性子照射場としての「常陽」と「もんじゅ」の役割分担

2.5 「常陽」再起動後の利用ニーズ

2.5.1 FaCT プロジェクト・FBR 実用化に向けた燃料・材料開発

FBR 開発において、燃料・材料開発は 2.3 に示したように最重要課題の一つである。FBR 燃料・材料開発計画において、「常陽」には(1)FaCT プロジェクト・実証炉計画における照射ニーズ、(2)実用炉に向けた照射ニーズがある。

(1) FaCT プロジェクト・実証炉計画における照射ニーズ

FaCT プロジェクトでの酸化物燃料の炉心概念のねらいを図 2.5.1-1 に示す。FaCT プロジェクト・実証炉計画においては、これらの革新技术の適用可否について判断する必要がある。国内でこの判断に資するための照射データ等を取得できる施設は「常陽」が唯一であり、「常陽」再起動後の最優先課題である。具体的な照射ニーズを図 2.5.1-2 に示す。FaCT プロジェクトや実証炉計画では、経済性向上のための高燃焼度概念成立性評価・設計用データ拡充、FBR 要素技術の高度化や環境負荷低減のためのマイナーアクチニド含有燃料開発等に係る照射試験が要求されている。

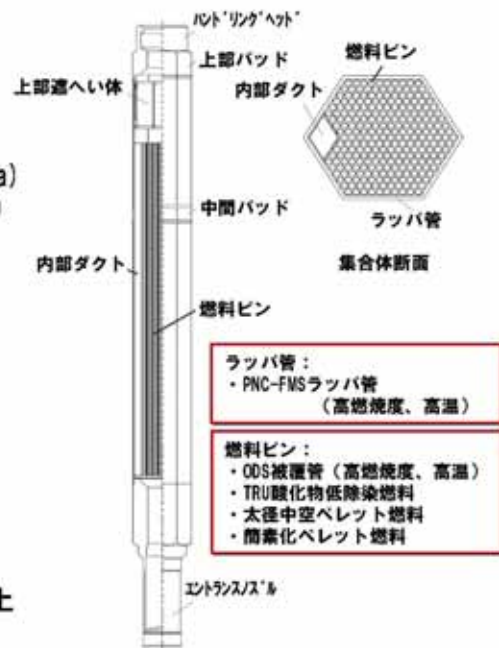
前述のように、「常陽」の再起動時期は 2012 年度が目標とされており、再起動後、順次、これらの照射試験を開始し、FaCT プロジェクトや実証炉計画に貢献することが肝要であると考ええる。なお、「もんじゅ」については、2.4 に示したように、当面は発電プラントとしての信頼性の実証に優先的に取り組む計画であり、また、照射試験に供するためには、炉心の高性能化や機能の整備等が必要であることから、「もんじゅ」において FaCT プロジェクトで要求されている照射試験を所期の計画どおり実施することは難しいことを確認した。

(2) 実用炉に向けた照射ニーズ

FBR は軽水炉と比較して運転実績が少なく、2015 年までにプラント像及び研究開発計画を示すことを目標としている FaCT プロジェクト以降であっても、さらなる安全性・経済性の向上を目指した研究開発が必要である。特に、FBR 実用炉の導入がエネルギー・環境・経済の観点で国民の利益として還元されるためには、図 2.5.1-3 に示すように、さらなる経済性向上を図るための燃料設計手法の合理化・裕度評価や燃料製造公差の緩和等のための照射試験が求められるとともに、燃料製造技術・再処理技術と連動した核拡散抵抗性対応方策に係る検証・実証も重要となる。

上記の目的を達成するためには、多種多様な照射データを取得する必要がある、これに対応できる国内照射施設を使用して研究開発を実施することが、期間・予算等の観点で効率的であると考ええる。

- 安全性
 - ・改良内部ダクト付集合体構造：再臨界回避
- 経済性
 - ・炉心部取出平均燃焼度：約150GWd/t
(ピーク燃焼度230～250GWd/t, ピーク照射量250dpa)
 - ・被覆管最高温度：700℃ (炉容器出口温度：550℃)
- 持続可能性
 - ・MA含有率：1～5%
 - (U, Pu) 燃料にも対応
 - 多様な燃料同位体組成考慮
- 燃料サイクル技術との整合
 - ・太径中空ペレット燃料：燃料製造費抑制
 - ・簡素化ペレット燃料：燃料製造費抑制
- その他
 - ・シリコン水素化物遮へい体：炉心コンパクト化
 - ・長寿命制御棒：長期運転サイクル
廃棄物低減、経済性向上



改良内部ダクト型燃料集合体の概念図

図 2.5.1-1 FaCT プロジェクトにおける炉心・燃料技術開発に関する要求課題

FBR実用化燃料の成立性評価及びデータの拡充等
(2012年以降順次照射試験を開始し、FaCTプロジェクトや実証炉計画に貢献)

経済性向上	高燃焼度概念 成立性評価	・ ODS被覆管燃料ピン照射 (230～250GWd/t^{*1}) ・ ODS被覆管・PNC-FMSラッパ管材料照射 (250dpa^{*1})
	設計用データの 拡充	・ ODS被覆管燃料ピンバンドル照射 ・ PNC-FMSラッパ管照射 ・ 太径中空ペレット燃料ピン照射 (FCMI^{*2}挙動確認) ・ 太径中空ペレット燃料ピンのPTM^{*3}照射 ・ 燃焼燃料のPTM^{*3}照射
	FBR技術要素 高度化	・ 高性能遮へい体用シリコン水素化物照射 ・ 長寿命制御棒用B₄C照射
環境負荷低減	MA含有 燃料開発	・ Am, Np含有酸化物燃料照射 (40GWd/t以上) ・ Cm含有酸化物燃料照射
安全性向上	再臨界回避	・ 内部ダクト付集合体構造の健全性確認試験

*1: ピーク値

*2: 燃料-被覆管機械的相互作用 (Fuel-Cladding Mechanical Interaction)

*3: 溶融限界線出力 (Power-to-Melt)

図 2.5.1-2 FaCT プロジェクトにおける照射ニーズ

・ **設計の合理化・高度化等のための照射試験**

燃料設計手法の合理化、裕度評価

：高線出力化、溶融限界出力の確認
高燃焼度化、破損限界の確認

燃料製造公差の緩和 ；公差の範囲を超える燃料の照射
炉心構成要素の長寿命化：長寿命遮へい体・制御棒
核拡散抵抗性対応方策等

・ **安全規制に係る照射データの充足**

実用炉に向けた規格・基準等の拡充

・ **技術者養成、教育研修**



照射試験等を遂行するための国内高速中性子照射炉が必要

図 2.5.1-3 実用炉に向けた照射ニーズ

2.5.2 FBR 開発を支える基礎基盤技術開発

FBR の実用化においては、燃料・材料開発は最重要課題の一つであるが、これのみならず様々な技術開発課題があり、照射ニーズ以外にも高速実験炉として、ナトリウム冷却型 FBR の設計・建設・運転に係る技術的経験の蓄積に加えて、FBR 開発を支える基礎基盤研究（図 2.5.2-1 参照）を実施していくことも「常陽」に課せられた重要な使命の一つである。

「常陽」は研究目的に応じて小回りの利く運転が可能であり、特殊な照射試験の他、革新的 FBR 技術を実証する場として、事故時のプラント挙動を模擬した試験を実施し、FBR 炉心の更なる安全性向上に寄与するデータを提供するとともに、自己作動型炉停止機構等の新技術の実証試験を行うことができると考える。また、レーザや光ファイバ等を用いた先進的・革新的プラント計測技術開発の実施と実証の場として用い、FBR の安全性・信頼性のさらなる向上を目指すことが可能である。さらには、実験炉の特長を活かして、炉心特性データ、マイナーアクチニドサンプルの照射による核特性データ、ナトリウム冷却系の純度データ、炉内構造物の放射化量等の様々な実機プラントデータを採取し、これにより FBR 核設計法の標準化や炉心の高性能化に向けての設計研究、核変換研究、不純物等の挙動解析、遮へい解析、ナトリウム機器の健全性評価等の多岐にわたる FBR 開発を支える基礎基盤研究に供することができる。

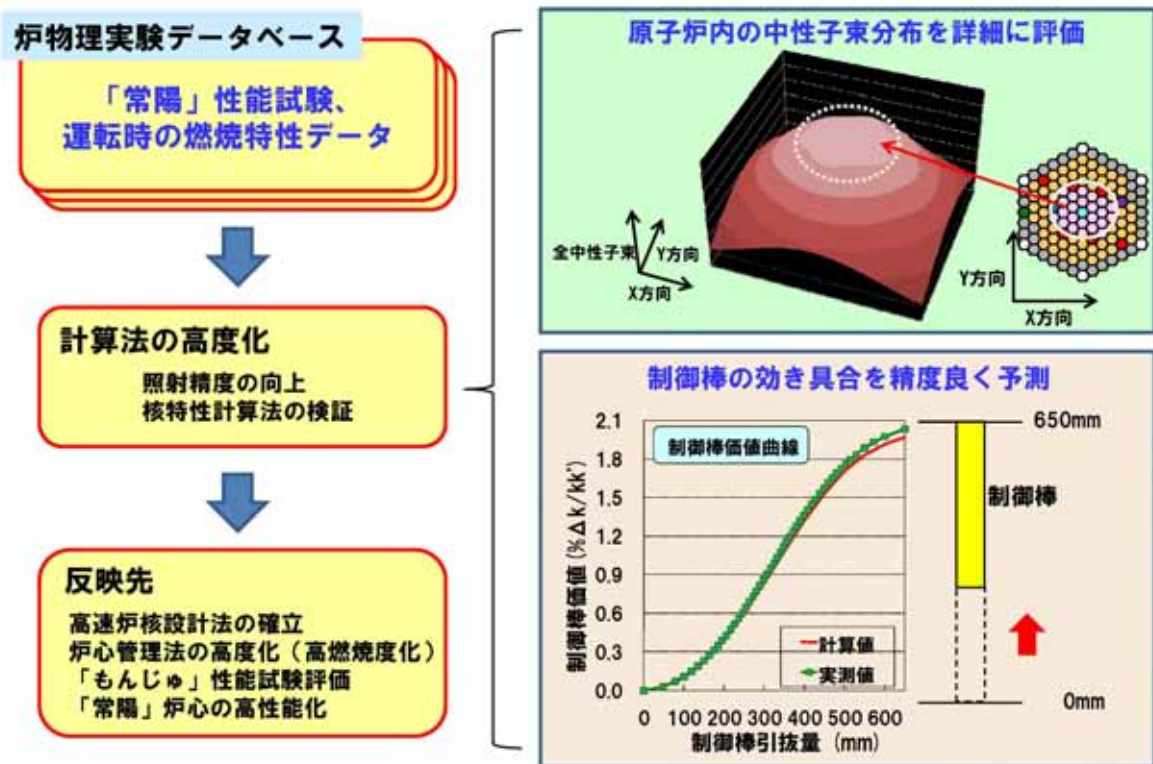


図 2.5.2-1 (1/2) FBR 基礎基盤研究への貢献
(核特性評価技術の開発)

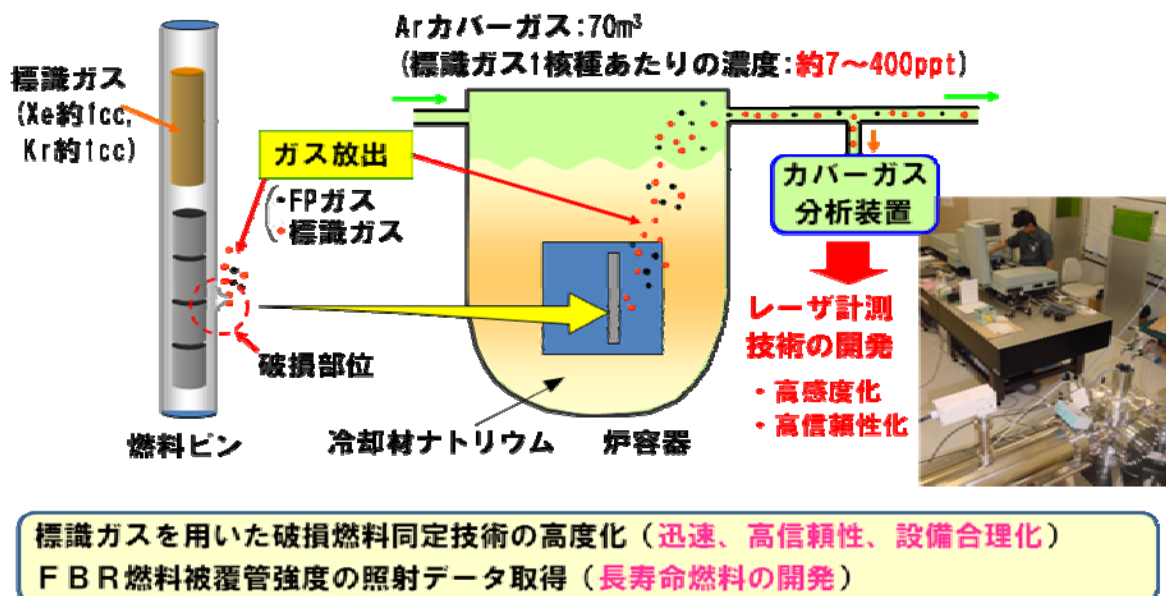


図 2.5.2-1 (2/2) FBR 基礎基盤研究への貢献
(燃料破損時のプラント運転手法最適化)

2.5.3 FBR 開発を支える人材の育成

FBR 開発を推進するにあたり、将来の研究・開発及び利用を支える人材・技術者を養成し、確保することは重要な課題である。これまでに、「常陽」では 1000 名以上の技術者・研究者が運転・保守・照射試験等に従事した他、実践的研修プログラム等により、約 200 名の実習生を受け入れている（図 2.5.3-1 参照）。

実験炉である「常陽」は、先端的・基盤的な技術を実機プラントに適用・実証してきたノウハウを含め、現場力を向上させ、工学規模での経験工学を蓄積できる場として最適な施設であると考え。今後も創造性を発揮して技術革新を担う人材を育成する場、若手・外国人研究者等多様な人材が活躍できる環境を有する場として「常陽」は必要不可欠である。「もんじゅ」は発電炉の運転・保守等に関する電気事業者やメーカーの人材育成、「常陽」は基礎基盤技術開発に関する大学やメーカーの人材育成をターゲットとすることで、技術力向上、技術伝承を効率的に促進できると考える。

<技術者養成>

1000名以上の研究者、技術者が「常陽」の運転・保守・照射試験に従事

- ・「もんじゅ」技術者・支援者：約150名
(MK-I、II運転・保守、MK-III改造工事、性能試験、特殊試験等)
- ・メーカ技術者の養成：約200名(運転・保守、炉心・プラント管理等)

<人材育成>

- ・夏期実習生、アジア諸国の技術者の研修(通算 約180名)
- ・大学との連携(東京大学専門職大学院への講師派遣(保全工学)及びインターンシップ研修、福井大学附属国際原子力工学研究所への協力)
- ・「常陽」等を用いた実践的研修プログラムを構築(2008年度 6大学20名)



図 2.5.3-1 技術者養成・人材育成への貢献

2.5.4 FBR 開発に係る国際協力における「常陽」の必要性

近年の科学技術の研究開発では、各国が協力することにより開発を効率的に進めており、FBR 開発においても第4世代原子力システムの研究開発に関する国際フォーラム（GIF）、国際原子力パートナーシップ（GNEP）等の協力体制が構築されている。FBR 開発における世界からの「常陽」への期待を図 2.5.4-1 に示す。また、国際協力への「常陽」の貢献に係る一例として、包括的アクチニドサイクルの国際実証（GACID）計画を図 2.5.4-2 に示す。

「常陽」は FBR 開発における数少ない研究施設であり、FBR 利用技術に係る原子力先進国として世界の FBR 開発をリードするために必要な施設であると考ええる。高速中性子照射炉を有効に活用して継続的に研究成果を発信することは、我が国が FBR 開発の根幹技術である燃料・材料開発の中核的研究拠点となることを可能とする。また、開発リスク・コストを低減した上で、技術者が現場での課題や問題に取り組むことにより創造性を発揮し、多くの経験を蓄積する場を確保することにより、優秀な技術者の育成を促進するとともに、世界標準となる技術を我が国が中心となって生み出すことを可能とする。

- ・ 国際協力における連携の強化
- ・ ナトリウム冷却型高速増殖炉開発への貢献
- ・ マイナーアクチノイド含有燃料、革新燃料開発等の要となる照射試験の実施（日仏米による包括的アクチノイドサイクル国際実証（GACID）計画等）

Nuclear Energy: Policies and Technology for the 21st Century

There is no FSTR (Fast Spectrum Test Reactor) in the United States and few in the world. ... JOYO appears to offer the most likely opportunity for conversion to an international FSTR user facility, to irradiate fuel elements and other materials, in partnership with a limited set of countries, including France, Japan, and the UK.

原子力：21世紀の政策と技術

高速中性子照射炉は、米国内には存在せず、世界でも数少ない。（中略）「常陽」は、フランス、日本、英国等が共用する国際的な燃料・材料の照射施設として、最も有望と考えられる。

（米国エネルギー省原子力諮問委員会報告書（2008年11月12日公表）より抜粋）

図 2.5.4-1 FBR 開発に関する世界からの「常陽」への期待

GACID (Global Actinide Cycle International Demonstration)

目的：高速増殖炉の実用炉用燃料として有力なマイナーアクチノイド（MA）含有燃料（TRU燃料とも言う）を、「常陽」及び「もんじゅ」を利用して実証

- 高速増殖炉で燃焼させることによりMA全量リサイクルの可能性を実証
- 3ステップで段階的に実施
- 第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF）／ナトリウム冷却型高速炉プロジェクトの一つ



図 2.5.4-2 包括的アクチノイドサイクルの国際実証

2.5.5 外部照射ニーズへの貢献

「常陽」の主な役割は FBR 開発であるが、反射体領域の中性子や炉心上部を有効利用する等、「常陽」の高いポテンシャルを積極的に展開することで、FBR 開発だけでなく、原子力産業・一般産業にも貢献することが可能である。これまでも、「常陽」は核融合炉材料開発や材料の照射損傷研究等のための照射試験にも利用され、約 40,000 試料（約 120 件の研究テーマ）に及ぶ大学等の受託照射が実施されてきたが、原子力機構が日本原子力学会の核燃料部会、材料部会の部会委員並びに原子力開発に携わる研究者に加え、宇宙開発、医療関係者、約 830 名を対象として実施したアンケート（回答者：182 名）では、軽水炉、核融合炉分野等において、「常陽」の高い中性子束の利用ニーズがあることが確認されている（図 2.5.5-1 参照）。

これらの利用ニーズへの対応として、「常陽」では照射機能の拡大と多様化方策が検討されている。このうち、原子炉運転の自動化、低中速中性子照射場、照射温度範囲の拡大については、既に原子炉設置変更許可が取得されている。また、「常陽」を再起動するためには、炉心上部機構の交換が必要であることから、これを契機として図 2.5.5-2 に示すように中性子ビーム孔等を設置することで UCS に照射機能を付加することが検討されている。

大学等における材料の照射挙動メカニズム等に関する研究開発の観点では、中性子のエネルギーや照射量及び照射温度が精度良く評価された重照射条件下で、再現性・外挿性がある照射データを取得することが重要である。「常陽」は、高精度な照射条件評価技術とともに、照射温度を測定・制御可能なオンラインの照射試験装置を有していることから、材料研究開発に利用可能な照射施設として極めて重要であると考ええる。

今後、上記施設・設備等の整備により、照射条件及び照射材料の範囲の拡大、照射時間の短縮が図られ、利用者の裾野を広げることが可能となる。「常陽」の多目的利用化の促進は、今後、原子力産業以外の研究・技術開発の活性化にも貢献できると考える。ただし、多目的利用については、人的資源、体制、付加的な設備の運営等を十分考慮した上で、利用者に照射場や必要なサービスを提供することを目指すことが望ましい。

◆ 軽水炉:	材料照射損傷に対する照射速度の影響 高照射量(30年以上相当)での材料強度変化 等
◆ 基礎、基盤研究:	原子炉用耐熱材料開発(セラミック、高融点金属等) 高放射線下での材料の腐食・防食機能 等
◆ 高速炉、革新炉:	燃料の過渡照射 等
◆ 核融合炉:	超電導磁石材料の高照射時挙動評価 等
◆ 核変換研究:	長寿命核分裂生成物の消滅 等
◆ RI製造:	医療用RI製造 等
◆ その他:	中性子検出器の開発 原子炉起因ニュートリノの研究 人工衛星用電池材料の照射損傷 等

図 2.5.5-1 外部からの「常陽」の利用ニーズに関する具体例

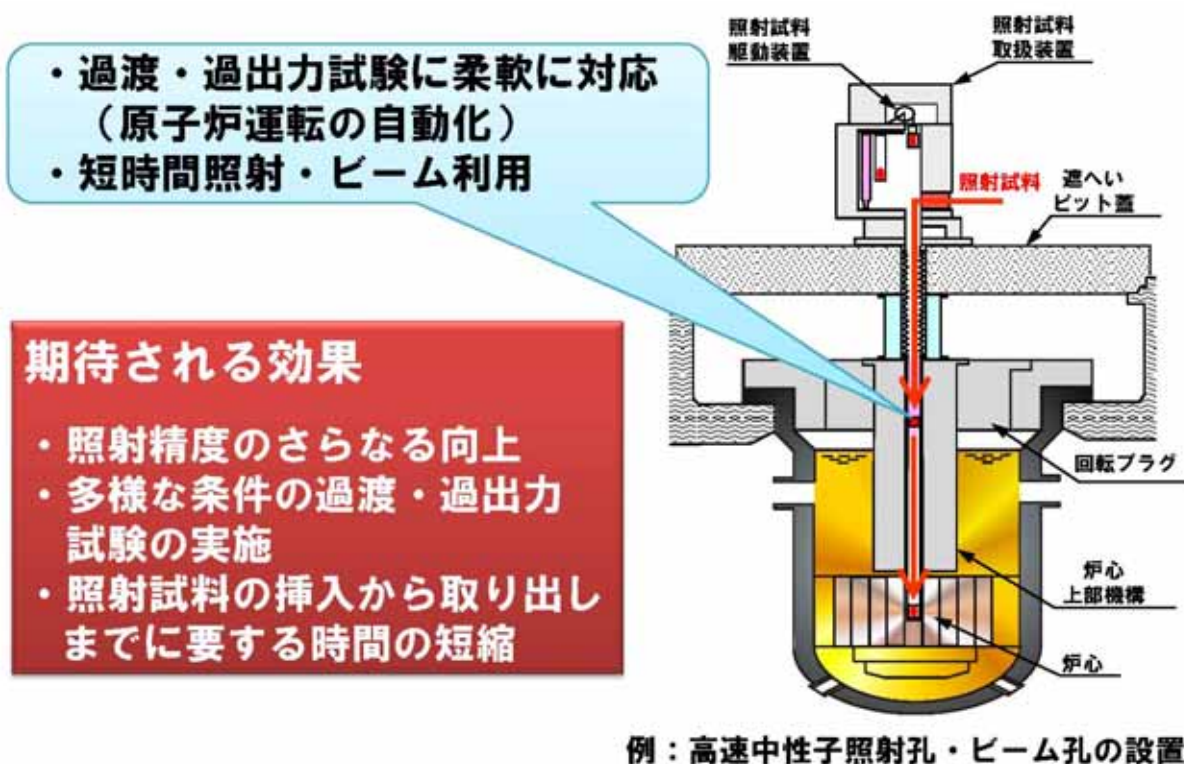


図 2.5.5-2 UCS の高機能化

結 言

本委員会において、「常陽」の役割と今後の必要性を検討し、この結果を踏まえて、「常陽」再起動の妥当性及び必要性を明確にするとともに、再起動後の「常陽」の利用等に対して提言した。

「常陽」は MARICO-2 試料部と回転プラグの干渉による燃料交換機能の一部阻害及び UCS 下面の整流板等の損傷により、UCS の復旧等が必要となるため、再起動時期の目標は 2012 年度となるが、その後、照射試験を開始することによって、FaCT プロジェクトや実証炉計画に貢献することが可能である。また、FaCT プロジェクト以降の FBR 開発においても、質・量ともに充実した照射データを取得し、FBR の更なる安全性・経済性等の向上を図るためには、国内に高速中性子照射炉を保持することが必要であることから、UCS 交換を含む「常陽」再起動に向けた復旧方策を実施し、できるだけ早期に「常陽」を再起動することが妥当であることを確認した。なお、UCS 交換作業の実施にあたっては、技術的成立性・安全対策について、今後、原子力機構において議論・精査するとともに、今回のトラブルの原因・教訓、再発防止対策を十分検討し、原子力機構内で適切に情報を共有することを要望した。

「常陽」は高速中性子照射炉として、照射利用のための幅広い許可を有し、試験目的に合わせた柔軟な原子炉の運転や照射試験が可能であることから、多種多様な燃料・材料の照射試験に資することができる。このため、「常陽」では新しい燃料・材料開発の先行的な照射試験、限界照射試験、オンラインでの照射試験を実施し、「もんじゅ」は実証炉、実用炉を目指した技術実証を主眼においた集合体レベルの照射試験に供する等の役割分担をすることで、FBR 実用炉開発に必要な安全性・経済性等の更なる向上に係る照射データを取得することが可能となる。また、実験炉としての特長を活かして、新技術の実証、先進的・革新的プラント計測技術開発等の多岐にわたる FBR 開発を支える基礎基盤研究に供することもできる。

さらに、照射後試験施設が隣接し、世界的にも数少ない高速中性子照射炉である「常陽」は、国際的協力体制の中で我が国が FBR 開発を主導的に進めていくためにも貴重な施設であり、「常陽」が有する高速中性子照射炉としての高いポテンシャルを有効に利用して外部照射ニーズにも展開することが期待される。

以上の議論を踏まえ、今後も「常陽」は FBR 実用化に向けた燃料・材料開発、新技術実証のための試験の実施、FBR 開発を支える人材育成等の役割を有する必要不可欠な施設であり、「常陽」を復旧せず再起動させない場合には、我が国の FBR 開発や国際貢献及び人材育成に多大な影響を与えることから、できるだけ早期に「常陽」を再起動させるべきとの結論を得た。

なお、UCS 復旧作業等の実施にあたっては、安全確保を優先することは言を俟たないが、本作業を単なる復旧に終わらせることなく、炉内観察・保守補修に関する技術的知見を蓄積すると共に、再起動後には世界をリードする FBR 技術開発を進めていくことを期待する。

「常陽」利用検討委員会の構成

№	氏 名	所 属
1	(委員) 井川 陽次郎	読売新聞東京本社 論説委員
2	(委員長) 岡 芳明	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
3	(委員) 河北 孝司	三菱 FBR システムズ(株) 取締役
4	(委員) 久保田 健一	(社)日本電機工業会 原子燃料サイクル専門委員会副委員長 (株)東芝 電力システム社 原子力事業部 技監
5	(委員) 四竈 樹男	東北大学 金属材料研究所 原子力材料物性学研究部門 教授
6	(委員) 竹田 敏一	大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 教授
7	(委員) 巽 良隆	日本原子力発電(株) 取締役 研究開発室担任
8	(委員) 東嶋 和子	ジャーナリスト
9	(委員) 二ノ方 壽	東京工業大学大学院 理工学研究科 原子核工学専攻 教授
10	(委員) 山名 元	京都大学 原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門 量子リサイクル工学分野 教授
11	(委員) 吉田 信之	電気事業連合会 原子力開発対策委員会 高速増殖炉委員会 副委員長 中部電力(株) 発電本部 原子力部 サイクル企画グループ長 (部長)
12	(社内委員) 永田 敬	(独)日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門 部門長
13	(社内委員) 廣井 博	(独)日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 所長
14	(社内委員) 近藤 悟	(独)日本原子力研究開発機構 経営企画部長

(敬称略：50 音順 所属は 2008 年 12 月 24 日時点)

幹事 : 大洗研究開発センター高速実験炉部長 鈴木 惣十
次世代原子力システム研究開発部門副部門長 佐賀山 豊
高速増殖炉研究開発センターもんじゅ開発部次長 高山 宏一
事務局 : 大洗研究開発センター高速実験炉部保全技術開発課

審議の経過

第1回 「常陽」利用検討委員会（議事概要：別添-1 参照）

1. 日時：平成20年12月24日（水）13：30～16：20
2. 場所：原子力機構東京事務所第1会議室
3. 議題：
 - （1） 「常陽」利用検討委員会の設置について
 - （2） 炉内干渉物の対策状況と今後の計画について
 - （3） 「常陽」の主な成果と今後の利用計画・ニーズについて
 - （4） 「常陽」の利用に関する委員からの報告
 - （5） その他

第2回 「常陽」利用検討委員会（議事概要：別添-2 参照）

1. 日時：平成21年2月25日（水）13：30～16：30
2. 場所：原子力機構大洗研究開発センター交流棟会議室
3. 議題：
 - （1） 第1回「常陽」利用検討委員会におけるコメントへの回答
 - （2） 「常陽」の利用に関する委員からの報告
 - （3） 「常陽」利用検討委員会報告書に関する検討
 - （4） その他（現場調査等）

第3回 「常陽」利用検討委員会（議事概要：別添-3 参照）

1. 日時：平成21年3月17日（火）14：00～16：30
2. 場所：原子力機構東京事務所第2会議室
3. 議題：
 - （1） 「常陽」利用検討委員会報告書に関する検討
 - （2） その他

「常陽」利用検討委員会（第1回） 議事概要

日時：平成20年12月24日（水）13：30～16：20

場所：原子力機構東京事務所第1会議室

出席者：岡委員長、井川委員、河北委員、竹田委員、巽委員、東嶋委員、吉田委員、
尾崎委員代理（久保田委員）、永田委員、廣井委員

原子力機構：中島理事、鈴木幹事、佐賀山幹事、此村幹事代理（高山幹事）

配付資料：

資料 1-1 「常陽」利用検討委員会の設置について

資料 1-2 炉内干渉物の対策状況と今後の計画について

資料 1-3 「常陽」がこれまで果たしてきた役割と主な成果について

資料 1-4 「常陽」の役割と今後の利用計画・ニーズについて

資料 1-5 「常陽」再起動に向けて

資料 1-6 「常陽」再起動への期待

議事内容：

1. 挨拶

本委員会の開催にあたって、中島理事及び岡委員長より挨拶があった。

2. 「常陽」利用検討委員会の設置について

事務局より、資料 1-1 に基づき、「常陽」利用検討委員会の設置趣旨等について説明があった。

3. 炉内干渉物対策の実施状況と今後の計画について

事務局より、資料 1-2 に基づき、炉内干渉物対策の実施状況と今後の計画について説明があった。以下に主なコメントを示す。

- ・対策の妥当性を判断するためには、トラブルの発生原因及び再発防止に係る情報が必要である。
- ・一般の方々の関心が高い安全性について、資料に「本作業により、放射性物質の放散等、外部に安全上のリスクがないこと」といった記載を追加する等の配慮が必要である。
- ・「常陽」をできるだけ早く運転再開することは必須であるが、その前提として(1)費用対効果、(2)時間、(3)交換・補修による技術的な成果や発展性があるかが問われるはずであり、よく吟味してほしい。

4. 「常陽」の主な成果と今後の利用計画・ニーズについて

鈴木幹事より、資料 1-3、1-4 に基づき、「常陽」の主な成果と今後の利用計画・ニーズについて説明があった。以下に主なコメントを示す。

- ・実験炉である特長を利用して、「早く」「信頼性の高い」「実機の」設計基礎・基盤データを提供し続けることが重要である。「常陽」は、「しっかりした基礎データ」、「工学規模での経験工学」、「それらを設計に展開できるエンジニアリング」を達成できる「研究成果の生産性の高い」プラントであり、その長所を伸ばすような取り組みが必要であると考える。
- ・独立行政法人にあっては経営感覚が問われる。今後、多目的利用を図るのであれば、利用料により運転費を賄えるのか等、どのような収支になるのかについても検討すべきである。

(原子力機構)「常陽」については、FBR 開発がメインストリームであり、多目的利用はあくまでも余力を活用して行うものであると認識している。

- ・日本には、FBR 国産化の目的があり、「常陽」や「もんじゅ」が建設された。単に経済性を議論するだけでなく、FBR 開発において、「常陽」を喪失した場合の影響を検討すること。
- ・「常陽」の利用は、現状、約 9 割が照射利用との話があったが、単に、照射だけであれば、海外炉を利用するほうが安価かもしれないが、過去の経験より、海外データには、品質確保やデータ追加依頼に多くの困難を伴うデメリットがある。また、技術者を養成し、技術力を向上することも重要な「常陽」の役割であると考えている。
- ・「常陽」を使うことができなくなった場合の影響評価として、海外炉を使った場合や「もんじゅ」を使った場合に、FBR 開発、基礎基盤、その他に対してどのようなメリット・デメリットがあるのか示すこと。
- ・「常陽」MK-I、II、III 炉心において、所期の目的を達成できたのか否か等について示すこと。

(原子力機構) MK-I 炉心の目的は、増殖性能の確認、Na 技術の実証、MK-II 炉心の目的は、照射炉として「常陽」を活用することであり、それぞれ所期の目的を達成した。MK-III 炉心の目的は、MK-II 炉心と同じであるが、まだ数サイクル運転したのみであり、成果がでるのはこれからである。これらを整理し、提示する。

5. 「常陽」の利用に関する委員からの報告

竹田委員より、資料 1-5 に基づき、「常陽」に対する大学からの期待等について報告があった。また、尾崎委員代理より、資料 1-6 に基づき、「常陽」に対するメーカーからの期待等について報告があった。

6. その他

次回委員会は平成 21 年 2 月 25 日（水）を候補とし、大洗研究開発センターにて現地調査とともに開催する予定とした。第 3 回委員会については、3 月 17 日（火）を候補とした。最終的な日程・タイムスケジュールについては、別途事務局で調整し、連絡する。

以 上

「常陽」利用検討委員会（第2回） 議事概要

日時：平成21年2月25日（水）13：30～16：30

場所：原子力機構・大洗 交流棟会議室

出席者：岡委員長、河北委員、久保田委員、四竈委員、竹田委員、巽委員、
二ノ方委員、吉田委員、永田委員、廣井委員、中村委員代理（近藤委員）
原子力機構：中島理事、鈴木幹事、佐賀山幹事、此村幹事代理（高山幹事）

配付資料：

- 資料 2-1 第1回「常陽」利用検討委員会におけるコメントへの回答
- 資料 2-2 高速実験炉「常陽」に対するコメント
- 資料 2-3 原子炉照射の考え方と「常陽」の役割
- 資料 2-4 「常陽」利用検討委員会検討報告書（目次案）

議事内容：

1. 第1回「常陽」利用検討委員会におけるコメントへの回答

鈴木幹事より、資料 2-1 に基づき、第1回「常陽」利用検討委員会におけるコメントへの回答について説明し、了解された。以下に主なコメントを示す。

- ・人材育成や技術伝承については「もんじゅ」との役割分担があり、発電炉である「もんじゅ」は電気事業者の人材育成、「常陽」は、大学やメーカの基礎基盤技術開発に関する人材育成がターゲットとなると思われる。
- ・今後の「常陽」の利用ニーズにおいて、「プラント安全性向上」とあるが、その内容について詳細に記載したほうがよい。

2. 「常陽」の利用に関する委員からの報告

巽委員より、資料 2-2 に基づき、「常陽」に対するコメントについて報告があった。また、四竈委員より、資料 2-3 に基づき、原子炉照射の考え方と「常陽」の役割について報告があった。

3. 「常陽」利用検討委員会報告書に関する検討

事務局より、資料 2-4 に基づき、「常陽」利用検討委員会検討報告書（目次案）について説明した。構成についてコメントがあり、事務局で対応することとした。

4. 現場確認

「常陽」において、MARICO-2 試料部模型、MARICO-2 保持部モックアップ・

モックアップ試験等を視察した。

5. その他

次回委員会は平成 21 年 3 月 17 日（火）を候補とし、東京事務所で開催する予定とした。最終的な日程・タイムスケジュールについては、別途事務局で調整し、連絡する。

以 上

「常陽」利用検討委員会（第3回） 議事概要

日時：平成21年3月17日（火）14：00～16：30

場所：原子力機構・東京事務所第2会議室

出席者：岡委員長、河北委員、久保田委員、四竈委員、竹田委員、巽委員、
二ノ方委員、山名委員、吉田委員、永田委員、廣井委員、
中村委員代理（近藤委員）
原子力機構：鈴木幹事、佐賀山幹事、田辺幹事代理（高山幹事）

配付資料：

資料 3-1 （独）日本原子力研究開発機構の高速実験炉「常陽」の役割と今後の必要性に関する検討報告書（案）

議事内容：

1. 「常陽」利用検討委員会報告書の検討

事務局より、資料 3-1 に基づき、（独）日本原子力研究開発機構の高速実験炉「常陽」の役割と今後の必要性に関する検討報告書（案）について説明があった。一部表現の見直し等についてコメントがあり、事務局で修正後、委員に再確認いただき報告書として取りまとめることで了解された。

2. その他

「常陽」利用検討委員会については、今回をもって終了することとなった。

以 上

原子力政策大綱等の一部抜粋

原子力政策大綱（2005 年 原子力委員会）

第 4 章 原子力研究開発の推進

4-1 原子力研究開発の進め方

原子力発電を基幹電源として維持していくことには大きな公益があるが、これを可能にするためには、核燃料サイクルを含めた既存技術の安全性、信頼性、経済性、供給安定性、環境適合性等を絶えず改良・改善していくとともに、次世代の供給を担うことのできる競争力のある革新技术の研究開発を実施していく必要がある。（中略）原子力技術は国際場裡においてはどの国を起源とする技術かが厳格に追求され、自国産の技術でないと国際展開等に不都合を生じることにも少なくないために、他の分野に比べ、我が国の独自技術を保有することを目指した研究開発を推進する重要性が高い。

4-1-3 革新的な技術システムを実用化候補まで発展させる研究開発

原子力利用や広範な科学技術分野に革新をもたらす可能性が大きい革新技术システムを、実用化の候補にまで発展させるための研究開発については、国及び研究開発機関が、産業界とロードマップ等を共有し、大学や産業界の協力・協働を得つつ、主体的に取り組むべきである。この場合、段階的な計画として取り組み、段階を進める際には国が成果と計画の評価を行い、実施すべき研究開発を重点化して進めることが肝要である。さらに、産業界が実用化の対象として選択できる環境を整えるために、研究開発政策と産業政策を担当する関係行政機関が政策連携を進めることも重要である。

この段階にある取組の最大のものは高速増殖炉サイクル技術の研究開発である。高速増殖炉サイクル技術は、長期的なエネルギー安定供給や放射性廃棄物の潜在的有害度の低減に貢献できる可能性を有することから、これまでの経験からの教訓を十分に踏まえつつ、その実用化に向けた研究開発を、日本原子力研究開発機構を中核として着実に推進するべきである。具体的には、研究開発の場の中核と位置付けられる「もんじゅ」の運転を早期に再開し、10 年程度以内を目途に「発電プラントとしての信頼性の実証」と「運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立」という所期の目的を達成することに優先して取り組むべきである。その後、「もんじゅ」はその発生する高速中性子を研究開発に提供できることを踏まえ、燃料製造及び再処理技術開発活動と連携して、高速増殖炉の実用化に向けた研究開発等の場として活用・利用することが期待される。その具体的な活動の内容については、その段階までの運転実績や「実用

化戦略調査研究」の成果を評価しつつ計画されるべきである。これらの活動には国際協力を活用することが重要であるから、「もんじゅ」及びその周辺施設を国際的な研究開発協力の拠点として整備し、国内外に開かれた研究開発を実施し、その成果を国内外に発信していくべきである。

また、日本原子力研究開発機構は、「もんじゅ」等の成果も踏まえ、高速増殖炉サイクルの適切な実用化像とそこに至るまでの研究開発計画を2015年頃に提示することを目的に、電気事業者とともに、電力中央研究所、製造事業者、大学等の協力を得つつ「実用化戦略調査研究」を実施している。その途中段階での取りまとめであるフェーズⅡの成果は2005年度末に取りまとめられ、国がその成果を評価して方針を提示することとしており、その後もその方針に沿って研究開発を的確に進めるべきである。その際、第四世代原子力システムに関する国際フォーラムにおけるこの分野の成果を取り入れることも重要である。

日本原子力研究開発機構は、「常陽」を始めとする国内外の研究開発施設を活用し、海外の優れた研究者の参加を求めて、高速増殖炉サイクル技術の裾野の広い研究開発も行うものとする。電力中央研究所、大学、製造事業者等においても、これらに連携して研究開発を実施することを期待する。

国は、これらの進捗状況等を適宜評価して、柔軟性のある戦略的な研究開発の方針を国民に提示していくべきである。特に、「実用化戦略調査研究」の取りまとめを受け、高速増殖炉サイクルの適切な実用化像と2050年頃からの商業ベースでの導入に至るまでの段階的な研究開発計画について2015年頃から国としての検討を行うことを念頭に、実用化戦略調査研究フェーズⅡの成果を速やかに評価して、その後の研究開発の方針を提示するものとする。なお、実用化に向けた次の段階の取組に位置付けられるべき実証炉については、これらの研究開発の過程で得られる種々の成果等を十分に評価した上で、具体的計画の決定を行うことが適切である。

高速増殖炉サイクルの研究開発方針（2006年 文部科学省）

我が国では、1956年に原子力委員会が策定した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」において、「最終的に国産を目標とする動力炉は、原子燃料資源の有効利用ひいてはエネルギーコストの低下への期待という見地から、増殖動力炉とする」とされているように、当初より高速増殖炉の国産開発を目標とし、1960年代初頭より高速増殖炉の調査研究が開始され、1960年代後半から本格的に研究開発が行われてきた。

動力炉開発の基本方針（1966 年 原子力委員会）

高速増殖炉の開発にあたっては、基礎的技術の蓄積に努めるとともに、国際協力をも行なって、自主的開発の効率的推進をはかることが必要である。その実施にあたっては、臨界実験装置等による基礎的研究ならびに実験炉および原型炉の開発を推進するものとする。なお、実験炉は、将来、照射試験炉としても利用する。

総合科学技術会議（2008 年 11 月）：

基本政策推進専門調査会 分野別推進総合 PT エネルギー分野 PT

高速実験炉「常陽」： 高速増殖炉の実用化に不可欠な高速中性子の照射場として、高速増殖炉用燃料・材料の高燃焼度化など、経済性向上等に係る革新技術の実証を進める。

付録 「常陽」利用検討委員会 発表資料

第 1 回「常陽」利用検討委員会 発表資料



炉内干渉物の対策状況と 今後の計画について

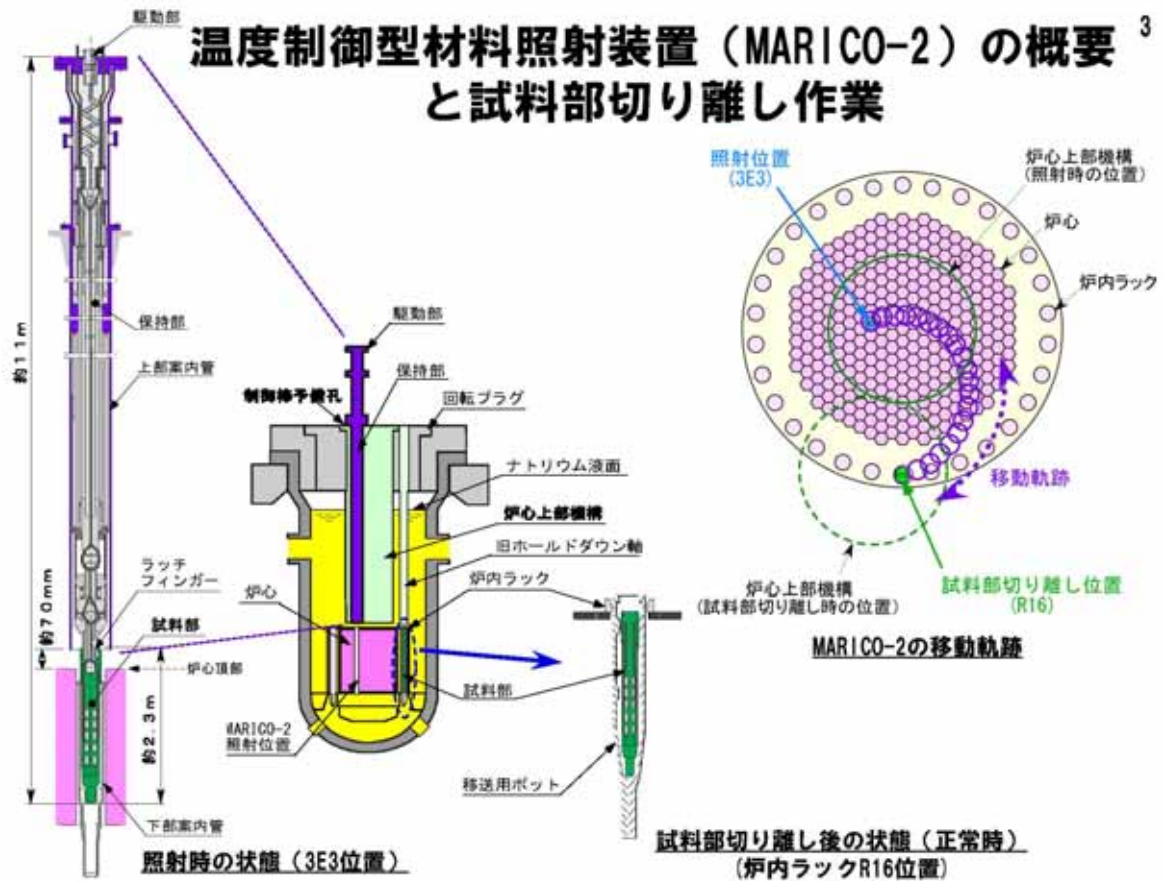


独立行政法人日本原子力研究開発機構

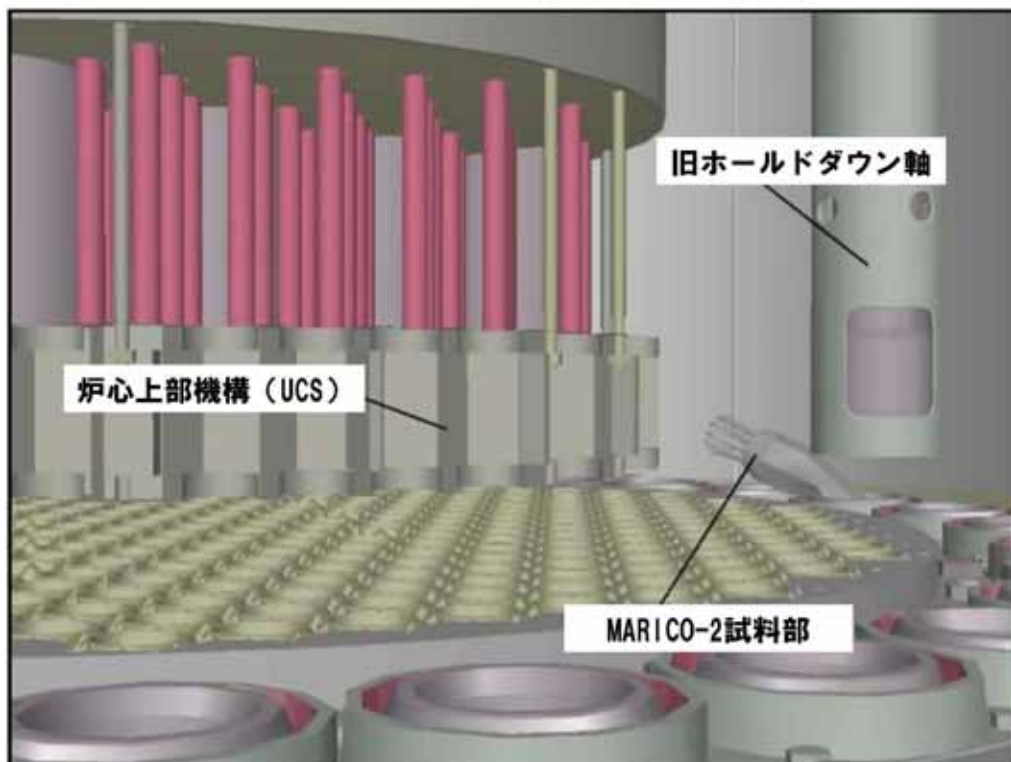
2

内 容

1. 炉内干渉物の概況
2. 炉心上部機構（UCS）の交換/補修
3. 海外高速炉の炉内観察・補修等の実績



3D-CADによる炉内状況の再現



UCSの交換/補修について (1/3)

- UCSの交換とMARICO-2試料部の回収 -

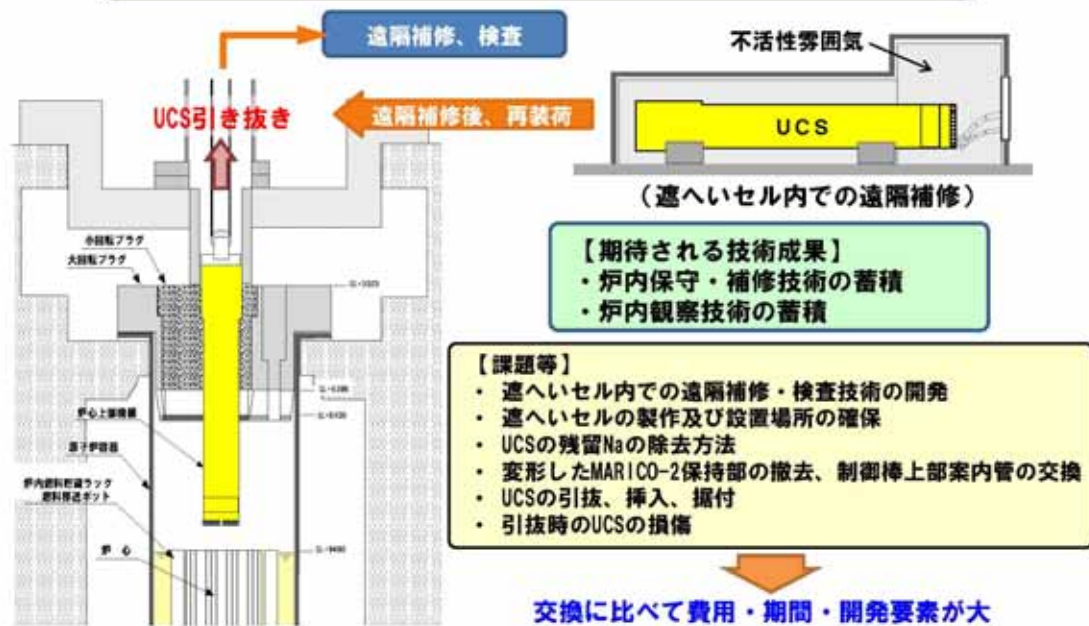
既設のUCSを撤去し、その貫通孔からMARICO-2試料部を回収した後、新規UCSを装荷



UCSの交換/補修について (2/3)

- UCSの炉外補修 -

UCSを引き抜き、遮へいセル内で遠隔補修し、再装荷
(UCSを引き抜いた貫通孔からMARICO-2試料部を回収)



UCSの交換/補修について (3/3)

- UCSの交換/補修方法の比較 -

	課 題
UCSの交換	・ 既設UCSの引抜 ・ Naが付着した放射性廃棄物の保管 ・ 新規UCSの挿入、据付
UCSの補修	・ 遠隔補修、検査技術開発 ・ 遮へいセルの製作、設置 ・ UCSの残留Naの除去方法 ・ MARICO-2保持部の撤去、制御棒上部案内管の交換 ・ UCSの引抜、引抜時のUCSの損傷 ・ 補修後のUCSの挿入、据付

「UCS補修」は「UCS交換」と比較して費用・期間・開発要素が大
「常陽」運転再開は、「UCS交換」により対応

10

海外高速炉の炉内観察・補修等の実績

炉	炉内観察・補修等の実績 (例)
Rhapsodie (仏)	炉内の制御設備用プラグに設置された熱電対の破損、熱電対装填管のNa腐食が見られたため、1976～1977年に制御設備用プラグの交換を実施。
Phenix (仏)	寿命延長プログラム(1998～2003年)の中で炉内観察等を実施。
EBR-II (米)	炉内で湾曲した集合体の回収(1979年)や落下した集合体の回収(1982年)を実施。
FBTR (印)	1987年、回転プラグ運転時に燃料取扱機の延長管と一部集合体に変形。ペリスコープ等を用いた炉内観察、変形した延長管の切断・交換を実施。



「常陽」がこれまで果たしてきた役割 と主な成果について



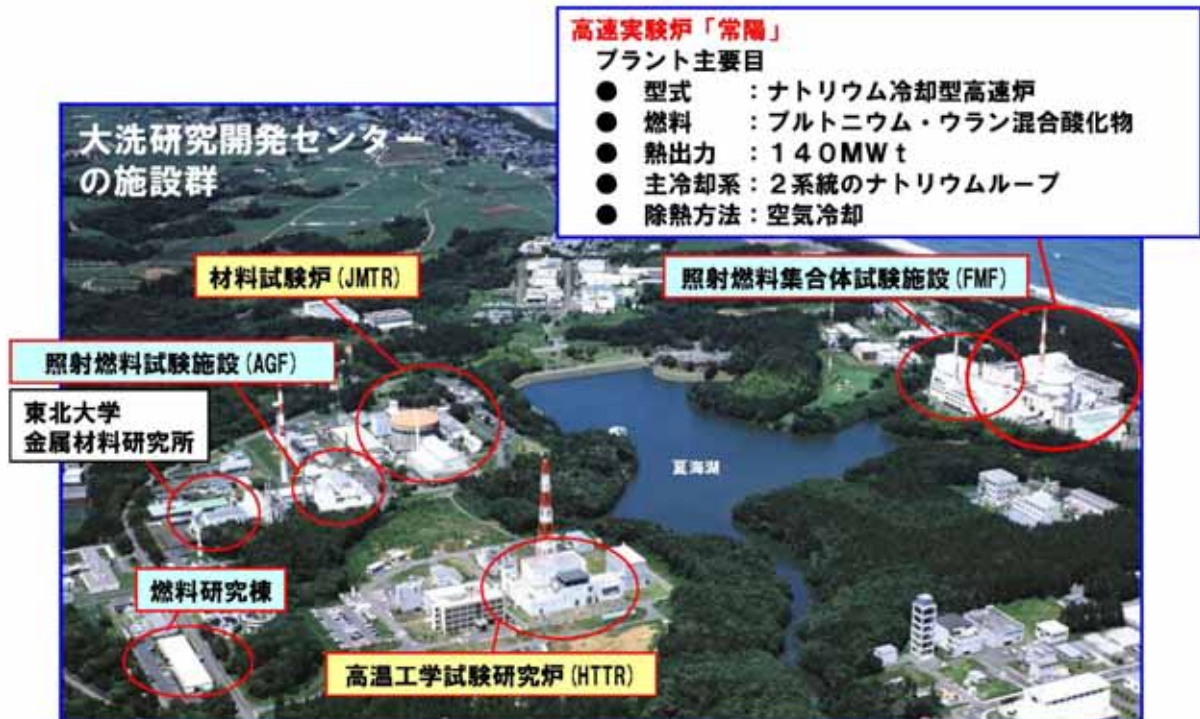
独立行政法人日本原子力研究開発機構

2

内 容

1. 「常陽」の概要
2. 「常陽」における技術開発成果と反映先
3. まとめ

「常陽」の概要

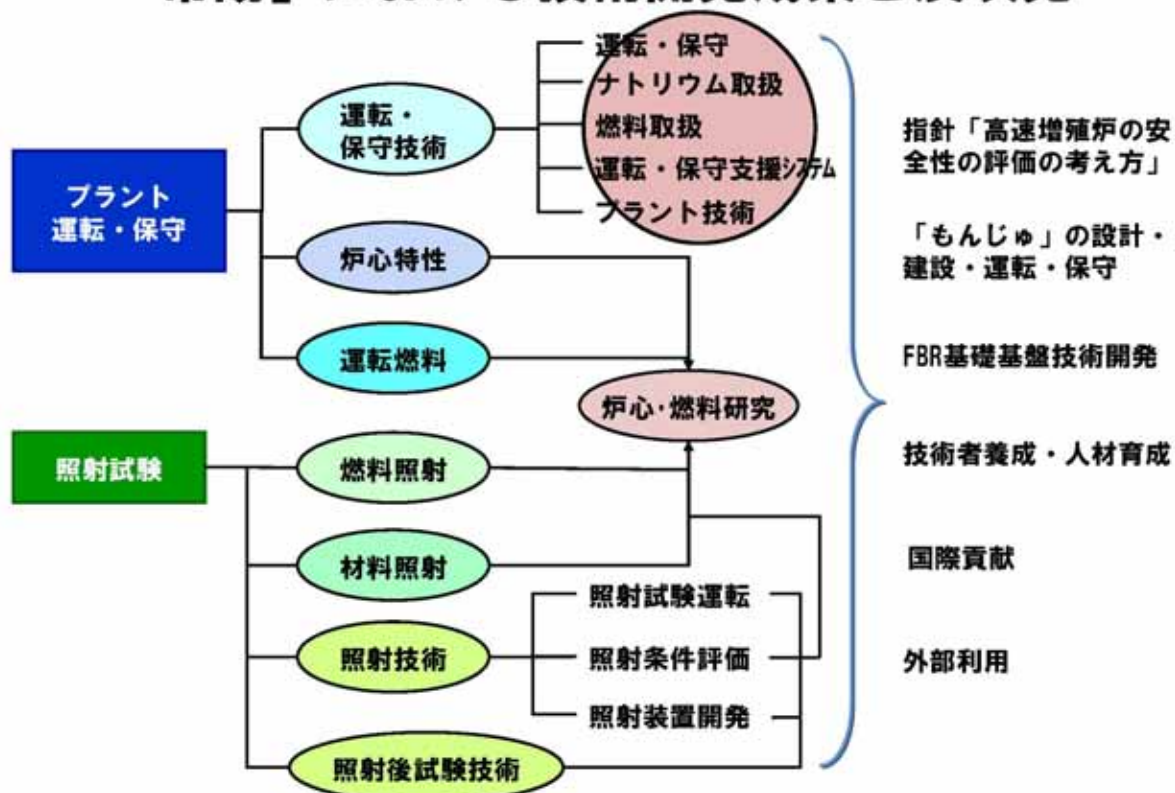


4

「常陽」の役割

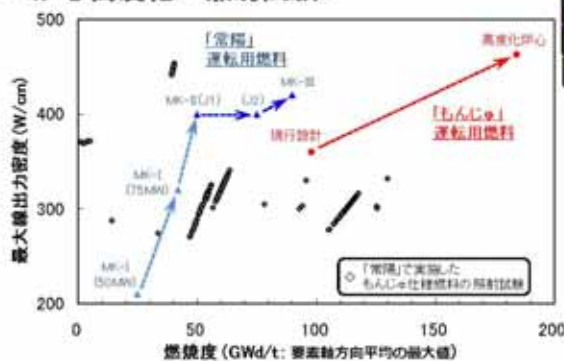
- ナトリウム冷却型高速炉の運転技術及び保守技術の確立
- FBRの燃料・材料開発のための照射試験
- 革新技術の実機プラントでの実証
- 技術者養成、教育研修、など

「常陽」における技術開発成果と反映先



「もんじゅ」への貢献

<炉心高度化・照射試験>

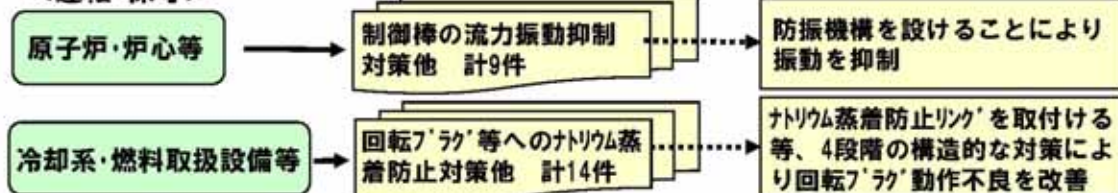


最高燃度までの健全性を検証
燃料温度計算法の信頼性確認
高燃度化のためのデータ拡充

<研究開発>

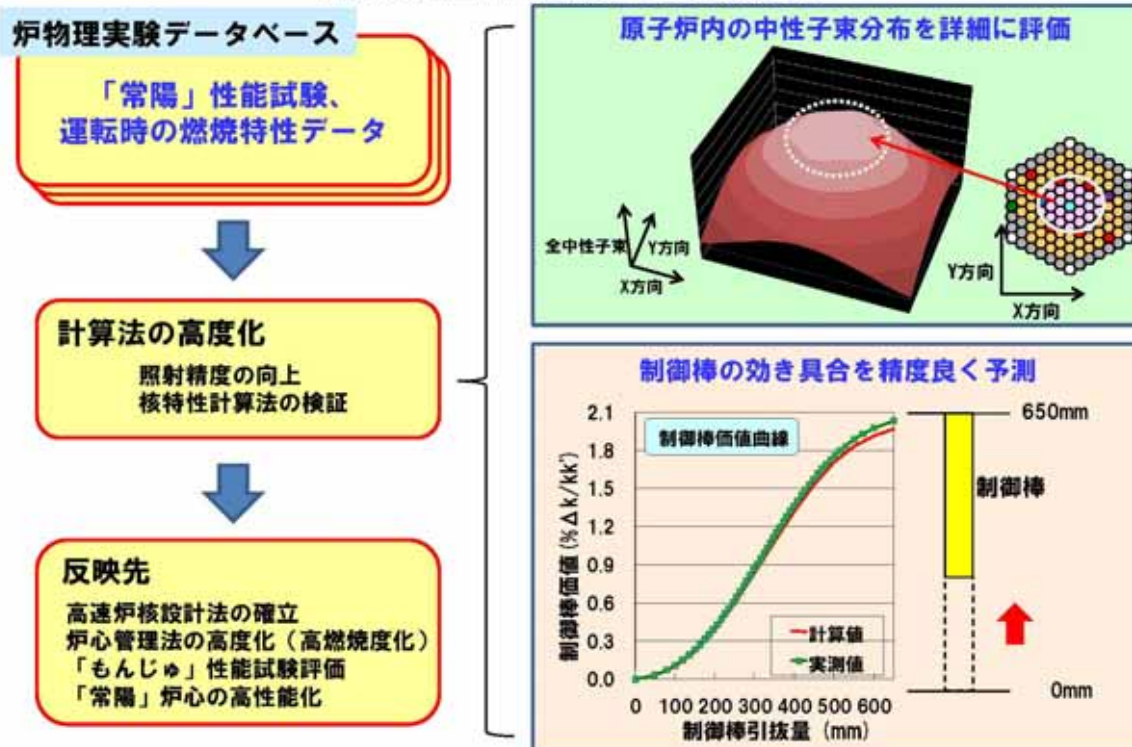
- 計算法の検証
 - ・ 「もんじゅ」性能試験評価
- プラントの安全性向上
 - ・ 燃料集合体出口流速計のデータ取得
 - ・ 燃料破損時の基準の策定

<運転・保守>

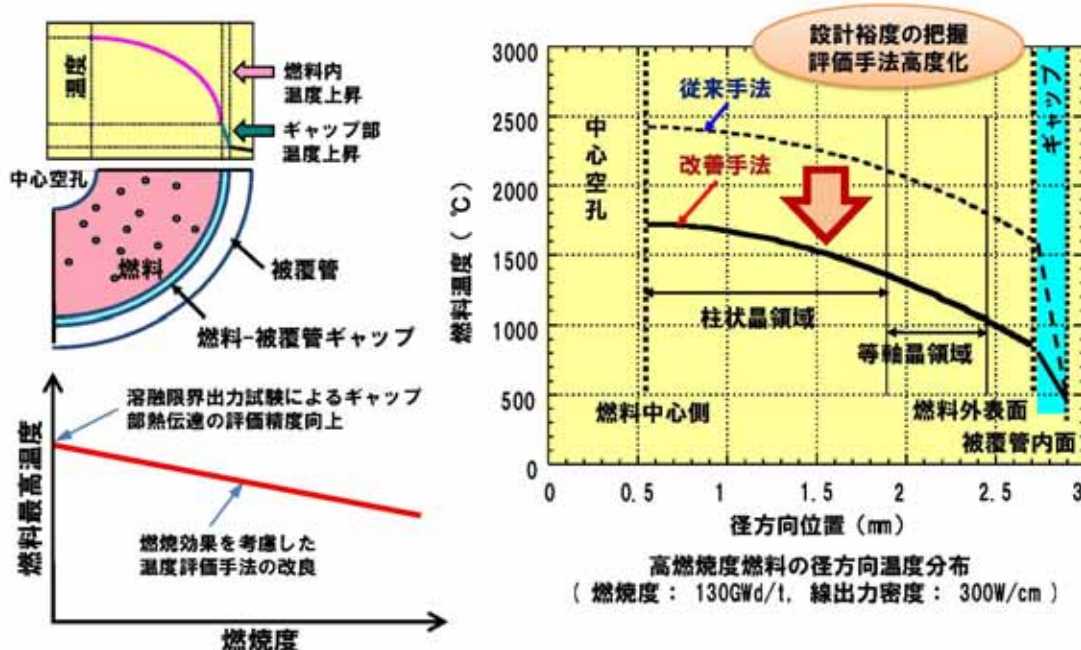


「常陽」での試験研究、運転・保守経験 → 「もんじゅ」の設計・運転手順等に反映

FBR基礎基盤技術開発への貢献 (核特性評価技術の開発)

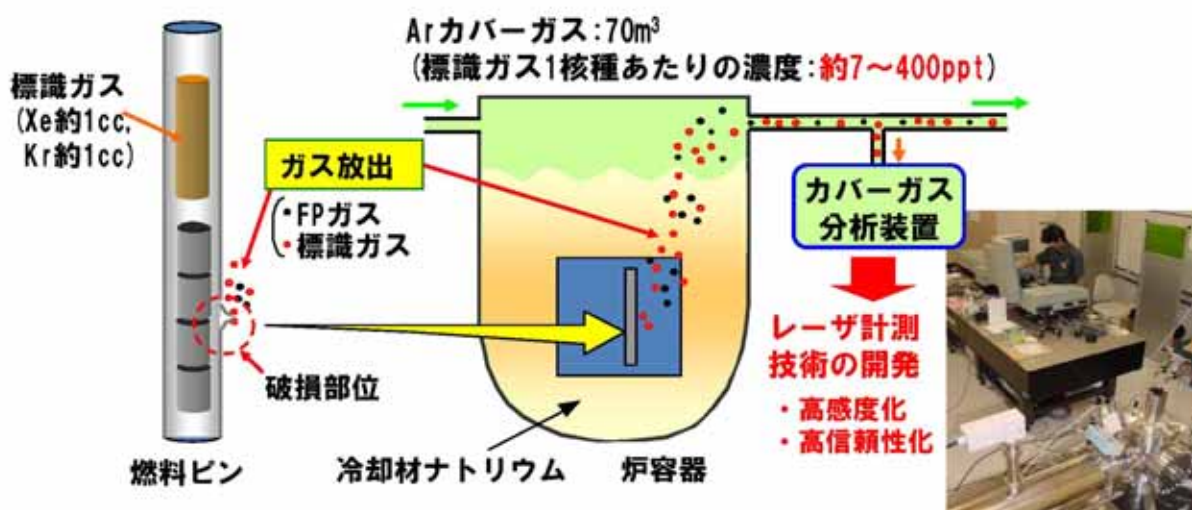


FBR基礎基盤技術開発への貢献 (燃料温度評価手法の開発)



燃料温度評価手法高度化 → 燃料の高性能化へ反映

FBR基礎基盤技術開発への貢献 (燃料破損時のプラント運転手法最適化)



標識ガスを用いた破損燃料同定技術の高度化 (迅速、高信頼性、設備合理化)
FBR燃料被覆管強度の照射データ取得 (長寿命燃料の開発)

FBR基礎基盤技術開発への貢献 (保守・補修技術の蓄積)

- ・MK-III冷却系改造工事において、世界でもほとんど例のない、大型ナトリウム機器の撤去、ナトリウム冷却系配管切断・溶接などの大規模な改造工事を経験



- ・機器故障データの蓄積・提供によりFBR機器信頼性データベースの拡充等に貢献
→ 高速炉の確率論的安全評価 (PSA) に活用

「常陽」を通じたFBR関連メーカーの技術確立

- MK-I、II炉心において、国家プロジェクトとして、国産技術により 設計、製作、建設
- MK-III炉心改造において、当初設計を超える140MWtへ世界初の熱出力アップ
世界に例のない主冷却系統中の機器を交換する大規模改造工事

FBRの特徴 (FBR/LWR)

	設 計	製 作	実 証
中性子 (高速/低速)	- 炉心設計(増殖性、安全性) - 放射線遮蔽	- 原子炉構造物、燃料 - 高性能材料(寿命等)	- 設計コード - 計算手法
冷却材 (ナトリウム/水)	- Naの流動、熱過渡 - Naによる腐食防止	- Naポンプ、熱交換器 - Na浄化装置	- Naの取扱技術 - Na機器の保守技術
温度・圧力 (500/290℃) (1/70気圧)	- 高温機器の構造設計 - 薄肉機器の耐震設計	原子炉容器、冷却系配管	- 機器の健全性 - 施工の技術

ナトリウム冷却炉特有の条件に対応した設計、製作、保守技術等を蓄積し、さらにMK-III改造工事を通じて、産業レベルとして確立

技術者養成・人材育成への貢献

<技術者養成>

- ・「もんじゅ」技術者・支援者：約150名(電力出向者含む)
(MK-I、II運転・保守、MK-III改造工事、性能試験、特殊試験等)
 - ・メーカー技術者の養成：約200名(運転・保守、炉心・プラント管理等)
- ※ MK-III改造工事の従事者：約600名

<人材育成>

- ・夏期実習生、アジア諸国の技術者の研修(通算 約180名)
- ・大学との連携(東京大学専門職大学院への講師派遣(保全工学)及びインターンシップ研修、福井大学附属原子力工学研究所(仮称)への協力)
- ・「常陽」等を用いた実践的研修プログラムを構築(平成20年度 6大学20名)



国内外研究機関からの照射依頼への対応

主な研究対象（利用実績（～2008年）：約4万試料、研究120件）

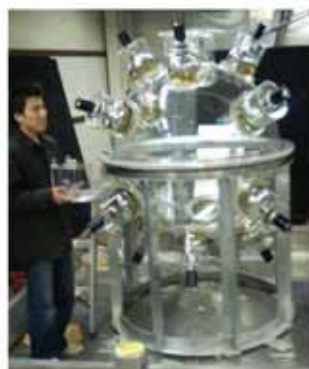
- (1) 核融合炉材料開発
- (2) 高速炉材料開発
- (3) 材料の照射損傷研究
- (4) 宇宙炉開発（宇宙船用原子炉材料照射）
- (5) 基礎物理研究（ニュートリノ実験など）
- (6) 海外研究機関からの依頼照射（仏国、米国）

核融合炉材料開発への貢献



核融合炉材料照射試料
（東北大学を中心とする大学連合）

宇宙の謎の解明



ニュートリノ検出器の
性能実験を「常陽」で実施
（KASKA実験グループ）

14

ま と め

- 「常陽」における技術成果を、FBRの指針の制定、「もんじゅ」設計・建設・運転等に反映
- FBR基礎基盤技術開発に貢献するとともに、メーカーを含めた技術者養成・人材育成の場として活用
- 国際協力、大学等の外部からの照射依頼への対応を通じて、基礎基盤研究に貢献

今後も、実験炉・高速中性子照射場として、高速炉開発、国際協力、高速炉安全研究、基礎基盤研究等に係る照射試験、技術者養成・人材育成に活用



「常陽」の役割と今後の利用計画・ニーズについて



独立行政法人日本原子力研究開発機構

2

内 容

1. 「常陽」の役割
2. 「常陽」の利用ニーズ
 - (1) FBR開発における技術開発課題
 - (2) 国内のアンケート調査結果
3. 「常陽」の照射性能の高度化
 - (1) FBR開発のための照射能力
 - (2) さらなる照射機能の拡大と多様化
4. まとめ

1. 「常陽」の役割

F B R開発における高速中性子照射場の必要性

- ・ F B Rの特徴：高中性子束
高出力密度
高燃焼度
高温ナトリウム環境
 - ・ 軽水炉と比較して少ない運転実績
- 等の厳しい使用環境

実用化のための研究開発要素が多い



実績の少ないF B Rでは、実機データ（照射、運転）が重要



「常陽」はこれらのニーズに応えることができる照射施設

「常陽」の役割

原子力政策大綱（平成17年10月）

第4章 原子力研究開発の推進

日本原子力研究開発機構は、「常陽」を始めとする国内外の研究開発施設を活用し、海外の優れた研究者の参加を求めて、高速増殖炉サイクル技術の裾野の広い研究開発も行うものとする。

総合科学技術会議（平成20年11月）

基本政策推進専門調査会 分野別推進総合PT エネルギー分野PT

高速実験炉「常陽」：高速増殖炉の実用化に不可欠な高速中性子の照射場として、高速増殖炉用燃料・材料の高燃焼度化など、経済性向上等に係る革新技術の実証を進める。



- FBRの燃料・材料開発のための照射試験
- 革新技術の実機プラントでの実証
（ナトリウム冷却型高速炉の運転・保守技術の確立を含む）
- 多目的利用
- 技術者養成、教育研修、など

2. 「常陽」の利用ニーズ

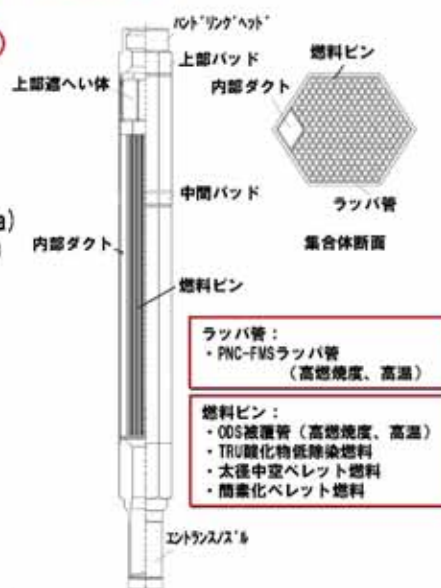
(1) FBR開発における技術開発課題

FBR開発における技術開発課題の例 (1/2)

高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCTプロジェクト) における
炉心・燃料技術開発に関する要求課題

FaCT酸化物燃料炉心概念のねらい (照射試験関連)

- 安全性
 - ・改良内部ダクト付集合体構造：再臨界回避
- 経済性
 - ・炉心部取出平均燃焼度：約150GWd/t
(ピーク燃焼度230~250GWd/t, ピーク照射量250dpa)
 - ・被覆管最高温度：700℃ (炉容器出口温度：550℃)
- 持続可能性
 - ・MA含有率：1~5%
 - (U, Pu) 燃料にも対応
 - 多様な燃料同位体組成考慮
- 燃料サイクル技術との整合
 - ・太径中空ペレット燃料：燃料製造費抑制
 - ・簡素化ペレット燃料：燃料製造費抑制
- その他
 - ・シリコン水素化合物遮へい体：炉心コンパクト化
 - ・長寿命制御棒：長期運転サイクル
廃棄物低減、経済性向上



改良内部ダクト型燃料集合体の概念図

FBR開発における技術開発課題の例（2/2）

高速増殖炉サイクル実用化研究開発（F a C Tプロジェクト）における
炉心・燃料技術開発に関する要求課題

FBR実用化燃料の成立性評価及びデータの拡充等

高燃焼度 燃料開発	・ ODS被覆管燃料ピン照射（230～250GWd/t*1） ・ ODS被覆管・PNC-FMSラッパ管材料照射（250dpa*1） ・ ODS被覆管燃料ピンバンドル照射 ・ PNC-FMSラッパ管照射
高度化 燃料開発	・ 太径中空ヘレット燃料ピン照射（FCMI*2挙動確認） ・ 太径中空ヘレット燃料ピンのPTM*3照射 ・ 燃焼燃料のPTM*3照射
MA含有 燃料開発	・ Am, Np含有酸化物燃料照射（40GWd/t以上） ・ Cm含有酸化物燃料照射
FBR技術要素 高度化	・ 内部ダクト付集合体構造の健全性確認試験 ・ 高性能遮へい体用シリコン水素化物照射 ・ 長寿命制御棒用B₄C照射

*1：ピーク値

*2：燃料-被覆管機械的相互作用（Fuel-Cladding Mechanical Interaction）

*3：溶融限界線出力（Power-to-Melt）

「常陽」で照射試験を実施することのメリット

高速増殖炉サイクルの革新的な技術の実用化のためには、
製造・照射・照射後試験を一元的に実施する必要がある。



「常陽」は照射試料の製造施設や、照射後試験施設が同一サイトにあり、また、先進燃料製造施設が同一地域にあるため、高速増殖炉サイクルの革新的な技術を効率的に開発できる。

2. 「常陽」の利用ニーズ

(2) 国内のアンケート調査結果

外部からの「常陽」照射利用ニーズに関する具体例

◆ 軽水炉:	材料照射損傷に対する照射速度の影響 高照射量(30年以上相当)での材料強度変化 等
◆ 基礎、基盤研究:	原子炉用耐熱材料開発(セラミック、高融点金属等) 高放射線下での材料の腐食・防食機能 等
◆ 高速炉、革新炉:	燃料の過渡照射 等
◆ 核融合炉:	超電導磁石材料の高照射時挙動評価 等
◆ 核変換研究:	長寿命核分裂生成物の消滅 等
◆ RI製造:	医療用RI製造 等
◆ その他:	中性子検出器の開発 原子炉起因ニュートリノの研究 人工衛星用電池材料の照射損傷 等

日本原子力学会の核燃料部会、材料部会の部会委員並びに原子力開発に携わる研究者に加え、宇宙開発、医療関係者、約830名を対象としたアンケートをJAEAにおいて実施（回答者：182名）

3. 「常陽」の照射性能の高度化

(1) FBR開発のための照射能力

FBR開発に必要な高速中性子照射場

高速炉の照射試験では、以下の項目が必要

- ・ 定常照射 → 多種多様な燃料・材料照射
 - (1) 広範な種類の燃料・材料照射
 - (2) 広範な照射条件（中性子束、温度、圧力）
- ・ 限界照射 → 通常運転を超える条件を模擬した燃料・材料照射
 - (1) 燃料溶融・被覆管破損に至る過酷な条件での照射
 - (2) 連続かつ迅速な出力上昇
- ・ 照射後試験 → 照射試験と密接に連携した照射後試験施設



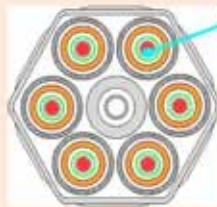
「常陽」はこれらの要件を満足する照射施設

多種多様な照射試験に対応した照射技術の高度化の例

16

キャプセル照射

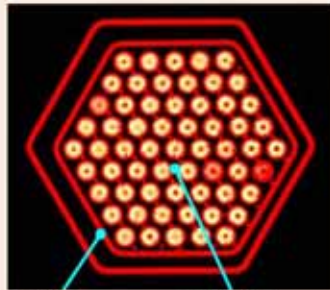
・頑丈なキャプセルによる実績の少ない燃料の照射



例：
・マイナーアクチニド (MA) 含有燃料
・金属燃料
・炭化物燃料
・窒化物燃料 など

燃料バンドル照射

多数のデータ取得、改良燃料の実証



試験用
ラッパ管

試験燃料
ピン束

炉内の照射条件の実測

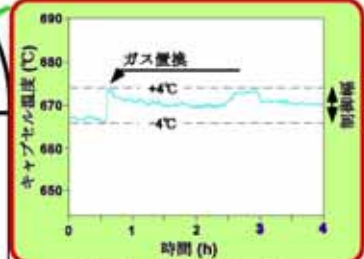


中性子モニタ

温度モニタ

温度をリアルタイムで計測・制御

・燃料中心温度の測定
・材料温度の制御 ($\pm 4^\circ\text{C}$)



オンラインでの 材料破断試験

試験片
加圧したヘリウムを封入
標識ガスにより、破断した試験片を特定

炉容器外における温度
可変の材料強度試験

通常運転を超える条件を模擬した照射試験技術

17

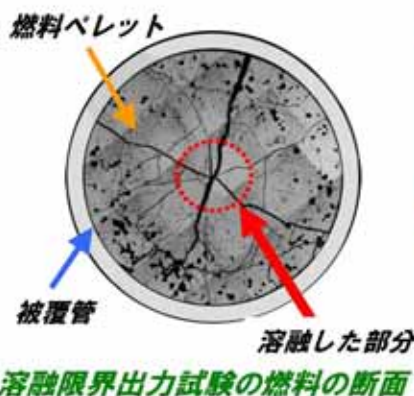
幅広い許認可と、20年を超える照射実績と運転・炉心管理技術により、FBR燃料の設計合理化(高出力、長寿命化)のための限界照射試験が高精度かつ高い信頼性で実施可能

計画的に、燃料を溶融、破損させる試験を実施

燃料の限界性能を精度よく把握

燃料の安全性・経済性の向上

過渡時に温度が最高となる照射初期の燃料温度を評価するため、連続的かつ迅速な出力上昇を実施



溶融限界出力試験の燃料の断面

溶融限界出力試験

燃料が溶融する出力の確認

・試験目的に応じた柔軟・きめ細かい原子炉運転
・高精度な出力評価及び照射後試験技術

出力増加 → 発電単価削減

燃料破損限界試験

被覆管が破損する燃焼度(使用期間)の確認

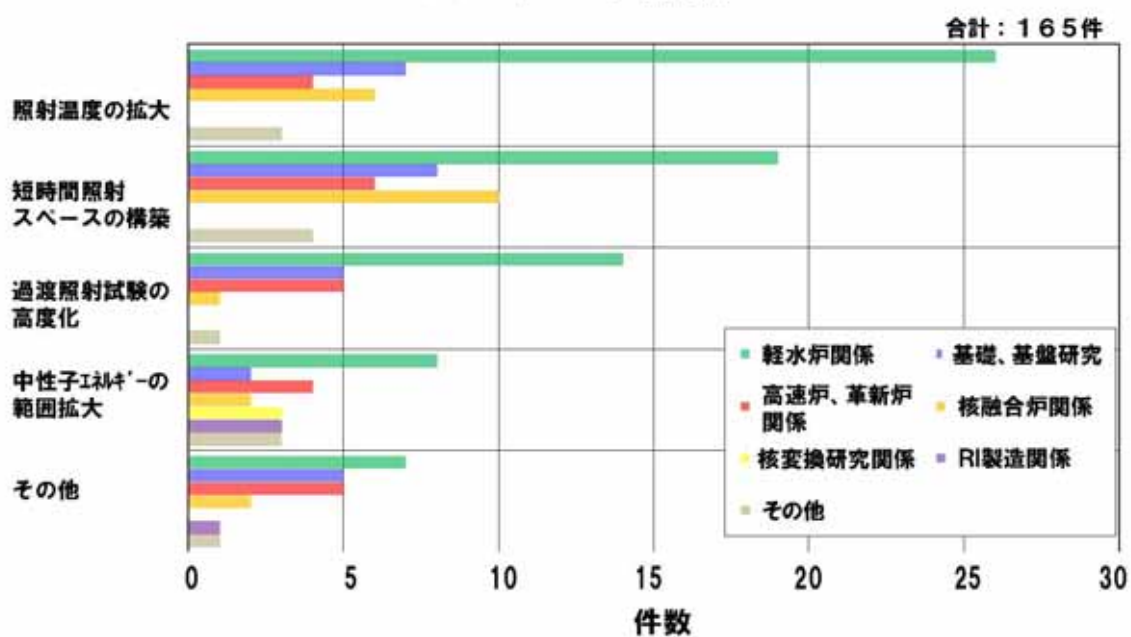
・高精度かつ迅速な燃料破損検出技術
・試験条件等をパラメータにした試験が可能

燃焼度増加 → 燃料費削減

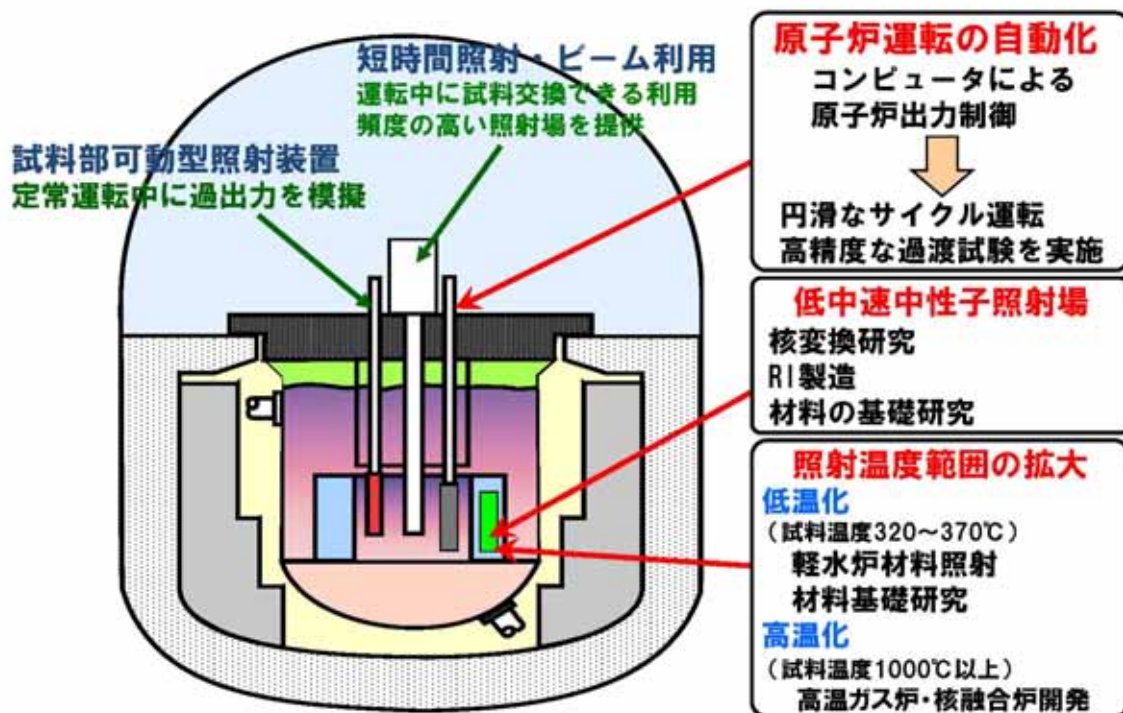
3. 「常陽」の照射性能の高度化

(2) さらなる照射機能の拡大と多様化

外部からの多目的利用へのニーズ － アンケート結果 －



「常陽」の照射機能の拡大と多様化

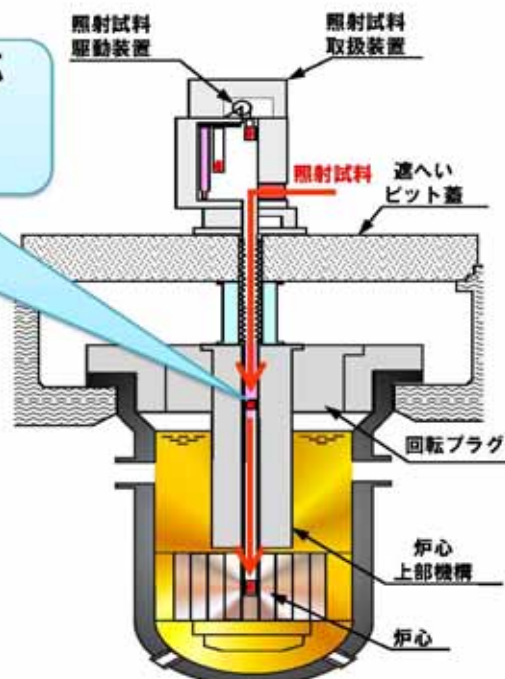


炉心上部機構（UCS）の高機能化

- ・ 過渡・過出力試験に柔軟に対応
(原子炉運転の自動化)
- ・ 短時間照射・ビーム利用

期待される効果

- ・ 照射精度のさらなる向上
- ・ フレキシブルな過渡試験
- ・ ターンアラウンドの短縮



例：高速中性子照射孔・ビーム孔の設置

ま と め

- ・ 実績の少ないFBRの開発においては、基礎基盤技術を長期的に支え、FBRの理解を得るため、実機高速炉の運転と高速中性子照射場の利用が必要であり、要求される照射ニーズに柔軟に対応できる「常陽」は有利
- ・ 20年以上にわたり蓄積してきた経験・許認可実績を基に、多種多様な照射試験や限界試験等を「常陽」で行うことにより、効率的にFBRを開発
- ・ さらなる照射機能の拡大により、従来のFBR開発に加えて、材料基礎研究、核融合炉開発、核変換研究等に対応
- ・ 開かれた照射施設として、人材育成・学術・産業に貢献



「常陽」の利用ニーズは高く、それに応える能力を有する

**「常陽」は、世界的にも無くてはならない
試験用高速炉（テスト・サーキット）**

高い照射性能

- 世界トップレベルの高速中性子束
- ニーズに応じた多様な照射試験装置

高い品質と信頼性

- 幅広い照射試料の仕様・照射条件に対応
- 隣接する照射後試験施設と連携した高品質な照射データ

豊富な運転実績

- 世界に類のない照射試験が実施可能
- 革新技術を先行的に実施して実用化に貢献

「常陽」再起動に向けて

－ 「常陽」への期待と国際利用 －

平成20年12月24日

大阪大学 竹田 敏一

1

内 容

1. 「常陽」への期待

- ・ 大学としての期待**

2. 国際利用

- ・ ベンチマーク**

2

1. 大学としての「常陽」への期待

1) 新しい手法・測定法の導出・適用

a) 手法（核計算）

・モンテカルロ法

照射済ドシメータや照射後試験により、
ピン単位の局所的な計算精度を検証

➡ 燃焼した高速炉心の解析法の確立

b) 測定法

・レーザ、光ファイバを用いたフラント計測

➡ 安全性、信頼性のさらなる向上

3

2) データの活用による研究活性化

a) 炉心特性データ

➡ 高速炉核設計法の標準化
高燃焼度化のための炉心改造

b) 照射済みMAサンプル

➡ 核変換研究

c) Na冷却系純度データ

➡ 不純物挙動解析

d) 炉心上部機構の放射化量、照射後試験データ

➡ 遮へい解析、Na機器健全性の評価

4

3) 若手人材育成

- ・ 学生実習への参加（卒論テーマ）
実機高速炉の解析



もんじゅ、実証炉へのフィードバック



原子力開発への魅力

5

2. 国際利用

1) 核データ

MA (Np、Am、Cm) データ比較

JENDL

JEFF

ENDF/B

2) FBR固有の安全性

フィードバック反応度試験

● 国際ベンチマーク

6

「常陽」再起動への期待（メーカーの立場から）

2008/12/24

(社)日本電機工業会

原子燃料サイクル専門委員会

1. 先行する高速実験炉として

我が国初のナトリウム冷却高速実験炉として設計・建設・運転実績を有する「常陽」は、これまで蓄積した30年に及ぶ豊富な運転管理技術・保守・改造経験を“もんじゅ”や将来建設予定の実証炉・実用炉に反映させるとともに、“もんじゅ”の初臨界後10年以上という長期にわたる期間において高速炉機器の(改造)設計・製造という貴重な機会を提供する場となり、メーカー技術の伝承・人材育成に大きく貢献した。また、新技術開発において、原子炉による貴重な試験データの取得・実績作りに貢献してきた。このような観点から、原子力プラントの寿命延長(60年～)という世界的動向も考慮すると、引続きさらなる運転・保守・改造経験やFBR実用化に向けた新技術の適用実績を蓄積することで、世界的にも運転継続プラントの少ない高速炉開発に関する貴重なデータを蓄積可能な炉であり、運転を再開・継続いただきたい。

2. 「常陽」の特長を生かして

実験炉「常陽」は、初期の増殖性能検証等を主眼としたMk・I炉心から、Mk・II炉心を経て高速中性子照射能力をより向上させたMk・III炉心へと改造された。一方、原型炉“もんじゅ”は、「常陽」と比べて炉の出力規模も大きく、また発電システムを装備しているため、高速炉発電プラントとしての検証運転を主体としたデータの蓄積が主目的となる。

このように、今後の高速炉実用化開発においては、発電炉としての“もんじゅ”の運転経験により得られるデータの蓄積と、実験炉として柔軟な運転計画が可能な「常陽」による新技術開発を組み合わせることにより、「常陽」と“もんじゅ”が両輪となって開発を進める必要がある。

さらに、燃料・材料の開発に不可欠な高速中性子照射場としての役割は、実験炉としての特長を生かして“もんじゅ”と役割分担することにより効率的な開発スケジュールが可能となる。

3. 補足事項

「常陽」のUCS交換／補修工事の計画立案に当たっては、FaCT計画等の他のプロジェクトへの影響がないよう配慮いただきたい。

以上

第 2 回「常陽」利用検討委員会 発表資料



第1回「常陽」利用検討委員会 におけるコメントへの回答



独立行政法人日本原子力研究開発機構

第1回「常陽」利用検討委員会における主なコメント

コメント	回答
1. 「常陽」の主な成果と今後の利用計画・ニーズについて	
日本には、FBR国産化の目的があり、「常陽」や「もんじゅ」が建設された。単に経済性を議論するだけでなく、FBR開発において、「常陽」を喪失した場合の影響を検討すること。	添付-1 参照
「常陽」を使うことができなくなった場合の影響評価として、海外炉を使った場合や「もんじゅ」を使った場合に、FBR開発、基礎基盤、その他に対してどのようなメリット・デメリットがあるのか示すこと（技術者を養成し、技術力を向上することを含む）。	
「常陽」MK-I、II、III炉心において、所期の目的を達成できたのか否か等について示すこと。	添付-2 参照
2. 炉内干渉物対策の実施状況と今後の計画について	
一般の方々の関心が高い安全性について、資料に「本作業により、放射性物質の放散等、外部に安全上のリスクがないこと」といった記載を追加する等の配慮が必要である。	添付-3 参照
対策の妥当性を判断するためには、トラブルの発生原因及び再発防止に係る情報が必要である。	添付-4 参照

添付-1

FBRサイクル開発における燃料開発と 「常陽」の停止による影響について

3

FBR国産技術開発の必要性和方向性

- 核燃料サイクルを含めた既存技術の安全性、信頼性、経済性、供給安定性、環境適合性等を**絶えず改良・改善**していくとともに、次世代の供給を担うことのできる**競争力のある革新技术の研究開発**を実施していく必要がある。
- 原子力技術は国際場裡においてはどの国を起源とする技術かが厳格に追求され、自国産の技術でないと国際展開等に不都合を生じることも少なくないために、他の分野に比べ、**我が国の独自技術を保有することを目指した研究開発を推進する重要性が高い。**

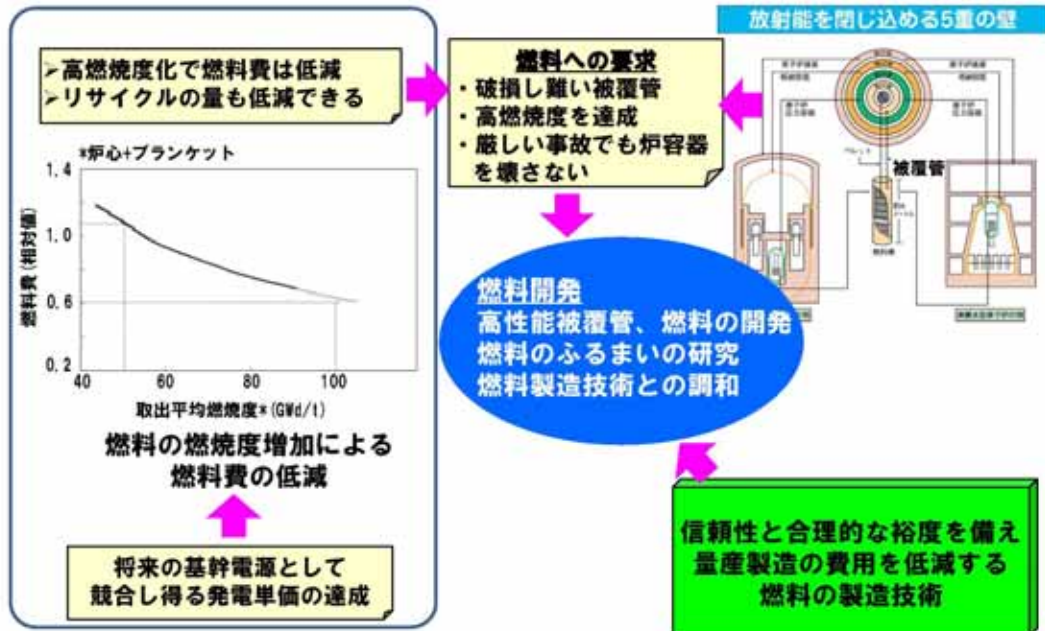
(2005年 原子力政策大綱)

- 我が国では、1956年に原子力委員会が策定した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」において、「最終的に国産を目標とする動力炉は、原子燃料資源の有効利用ひいてはエネルギーコストの低下への期待という見地から、増殖動力炉とする」とされているように、**当初より高速増殖炉の国産開発を目標**とし、1960年代初頭より高速増殖炉の調査研究が開始され、1960年代後半から本格的に研究開発が行われてきた。

(2006年 文部科学省「高速増殖炉サイクルの研究開発方針について」)

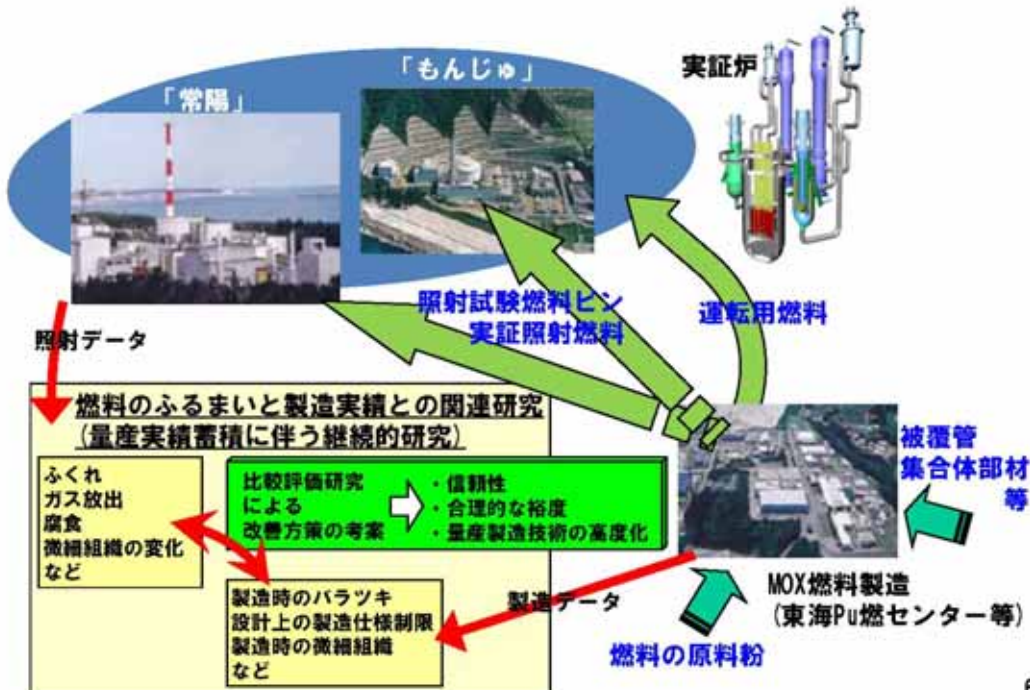
 **FBR国産技術開発の推進には国内高速中性子照射炉が必須** 4

高速炉の実用化において燃料開発は 経済性向上の観点で最重要課題の一つ



5

燃料開発に係る国内でのデータ取得体制



6

FBR燃料開発計画（照射試験等）（1/2）

- FaCTプロジェクトにおける照射ニーズ -

FBR実用化燃料の成立性評価及びデータの拡充等
 （2012年頃以降に順次、照射試験を開始し、FaCTプロジェクトや実証炉計画に貢献）

経済性向上	高燃焼度概念 成立性評価	・ ODS被覆管燃料ピン照射（230～250GWd/t^{*1}） ・ ODS被覆管・PNC-FMSラップ管材料照射（250dpa^{*1}）
	設計用データの 拡充	・ ODS被覆管燃料ピンバンドル照射 ・ PNC-FMSラップ管照射 ・ 太径中空ヘレット燃料ピン照射（FCMI^{*2}挙動確認） ・ 太径中空ヘレット燃料ピンのPTM^{*3}照射 ・ 燃焼燃料のPTM^{*3}照射
	FBR技術要素 高度化	・ 高性能遮へい体用SiC/AlN水素化物照射 ・ 長寿命制御棒用B₄C照射
環境負荷低減	MA含有 燃料開発	・ Am、Np含有酸化物燃料照射（40GWd/t以上） ・ Cm含有酸化物燃料照射
安全性向上	再臨界回避	・ 内部ダクト付集合体構造の健全性確認試験

*1：ピーク値

*2：燃料-被覆管機械的相互作用 (Fuel-Cladding Mechanical Interaction)

*3：溶融限界線出力 (Power-to-Melt)

7

FBR燃料開発計画（照射試験等）（2/2）

- 実用炉に向けた照射ニーズ等 -

・ 設計の合理化・高度化等のための照射試験

燃料設計手法の合理化、裕度評価

：高線出力化、溶融限界出力の確認
 高燃焼度化、破損限界の確認

燃料製造公差の緩和：公差の範囲を超える燃料の照射

炉心構成要素の長寿命化：長寿命遮へい体・制御棒

核拡散抵抗性対応方策等

・ 安全規制に係る照射データの充足

実用炉に向けた規格・基準等の拡充

・ 技術者養成、教育研修



照射試験等を遂行するための国内高速中性子照射炉が必要

8

「常陽」の停止による影響

- 海外炉を利用した場合のメリット・デメリット -

燃料開発に係る国内でのデータ取得のメリット

➤ 質・量ともに充実したデータ

- ◆ 「常陽」では合理的な裕度の設定や経済的整合性を有する信頼性の確保等に必要な精緻な評価が可能

➤ 多量データ取得の負担軽減

- ◆ パラメトリックに多量のデータを取得していくには、国内照射・国内データ取得が輸送負担・費用負担の軽減の面でも適切

➤ 製造技術関連データの保護

- ◆ 日本独自技術で製造した燃料は国内での試験により、詳細なノウハウの流出を防止

➤ 国内技術の向上・蓄積

- ◆ 国内試験は国内の技術者育成に寄与



海外炉を利用した場合、上記メリットを喪失し、我が国の独自技術を保有することを目指した研究開発の推進に、照射炉の所有国の原子力・外交上の政策の影響や、コストの増加等のリスクが生じる。

9

「常陽」の必要性

- ・ 燃料開発はFBR開発の最重要課題の一つ
- ・ 日本独自の技術・ノウハウを多く含んだ燃料の量産技術開発を推進することが重要
- ・ 燃料の高度化のためには、国内で質・量ともに充実した燃料・材料の照射データを取得することが必要
- ・ 海外炉を利用した場合、我が国の独自技術を保有することを目指した研究開発の推進に照射炉の所有国の原子力や外交上の政策の影響や、コストの増加等のリスクが生じる。
- ・ 「もんじゅ」は発電プラントの実証が運転再開後の役割であり、さらに、照射試験を実施するためには、炉心の変更や設備の整備が必要であるため、照射開始までには時間を要する。

FBR開発に係る我が国の自主性・独自性を堅持するとともに、FBR実証炉・実用炉・実用炉供用以降の技術開発に照射データを供給できる国内高速中性子照射炉は「常陽」が唯一



「常陽」の早期の再起動が必要

10

添付-2

「常陽」の使命と役割

11

「常陽」の使命

動力炉開発の基本方針（原子力委員会：1966年）

高速増殖炉の開発にあたっては、基礎的技術の蓄積に努めるとともに、国際協力をも行なって、自主開発の効率的推進をはかることが必要である。その実施にあたっては、臨界実験装置等による基礎的研究ならびに実験炉および原型炉の開発を推進するものとする。なお、実験炉は、将来、照射試験炉としても利用する。



「常陽」設置の目的

- ・ 高速増殖炉に関する技術的経験（自主開発技術：設計・建設・運転等）の取得・蓄積 : MK-I、MK-II、MK-III
- ・ 高速増殖炉用燃料材料等の照射試験施設として利用 : MK-II、MK-III

※ MK-III：高速増殖炉実用化のための燃料・材料開発用照射炉として活用するため、実用炉での目標燃焼度（15万～20万MWd/t以上）を踏まえ、高中性子束化と照射場の拡大等を図り、照射性能を向上

12

「常陽」の役割（1/2）

— 実験炉としての成果と今後の役割 —

① 成果

- ・増殖性能の実証（MK-II炉心）
- ・ナトリウム技術の確立
（運転・保守・保全技術の蓄積、MK-III改造工事）
- ・核燃料サイクルの輪の実証
- ・基礎的な安全性の確認（自然循環、燃料破損模擬試験）
- ・安全、確実な運転（炉心・燃料の設計・管理の実証）

② 今後の役割

- ・プラント安全性向上（固有安全性実証試験）
- ・新技術実証（SASS、レーザによる破損燃料の同定）
- ・先進的・革新的プラント計測技術開発（光ファイバを用いた高速炉プラント構造健全性監視技術）
- ・新材料の実機使用実績蓄積（316FR鋼、高Ni鋼等）
- ・FBR技術の伝承、人材育成

13

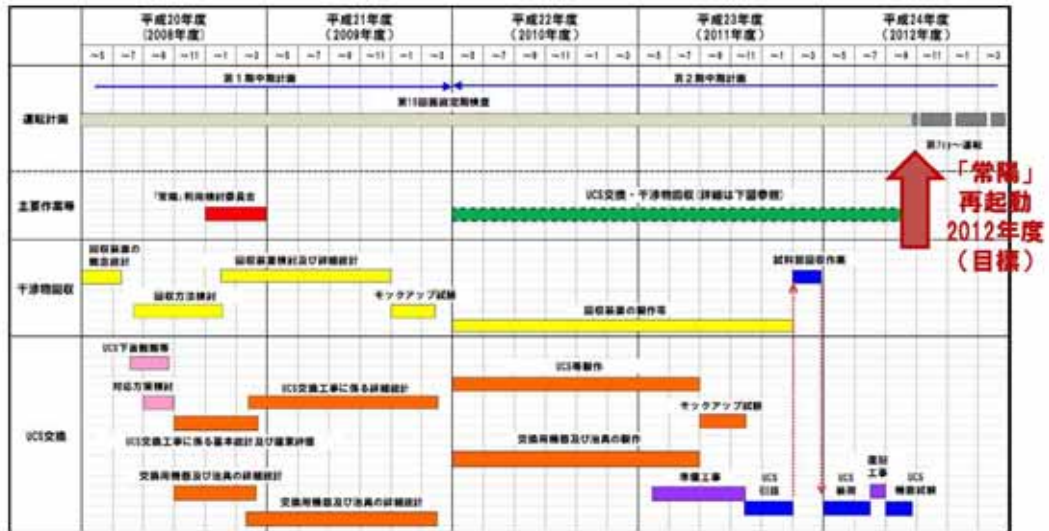
「常陽」の役割（2/2）

— 照射炉としての成果と今後の役割 —

目的	MK-II炉心までの実績	MK-III炉心の役割
	既存技術の高度化・大型化	革新技术導入、軽水炉に比肩する経済性達成
実証炉	MOX燃料（軸非均質、中空） 改良オーステナイト鋼被覆管の照射 限界性能の確認（PTM等）	ODS鋼被覆管、簡素化ペレットの照射 MA-MOX燃料（副概念：金属燃料） 限界性能の確認（PTM、RTCB等） 規格・基準類作成のためのデータ取得
もんじゅ	現行炉心の確認	高度化炉心の先行照射
	改良オーステナイト鋼 低密度ペレットの照射	ODS鋼、高密度中空ペレット 長寿命制御棒の照射
国際協力	2国間協力	日本主導の国際協力へ
	日米、日仏協力による試験	Gen-IV、GNEP等の国際協力のツールとして活用
基礎基盤	FBR実用化のための技術開発及び基礎・基盤データ取得	
	炉心核特性評価手法の高度化・標準化、燃料設計手法の高度化	
外部利用	依頼に基づく対応	利用の拡大
	材料の照射挙動に関する基礎研究	軽水炉、ガス炉、核融合炉等の多目的利用

14

「常陽」の再起動計画（目標）



「常陽」を2012年度に再起動することで、
FaCT7'のシ'ェ外に必要な照射試験への影響を小さく抑えられる
＜今後、期間（約3年半）短縮・予算（約35億円）低減のため、更に努力する＞

添付-3

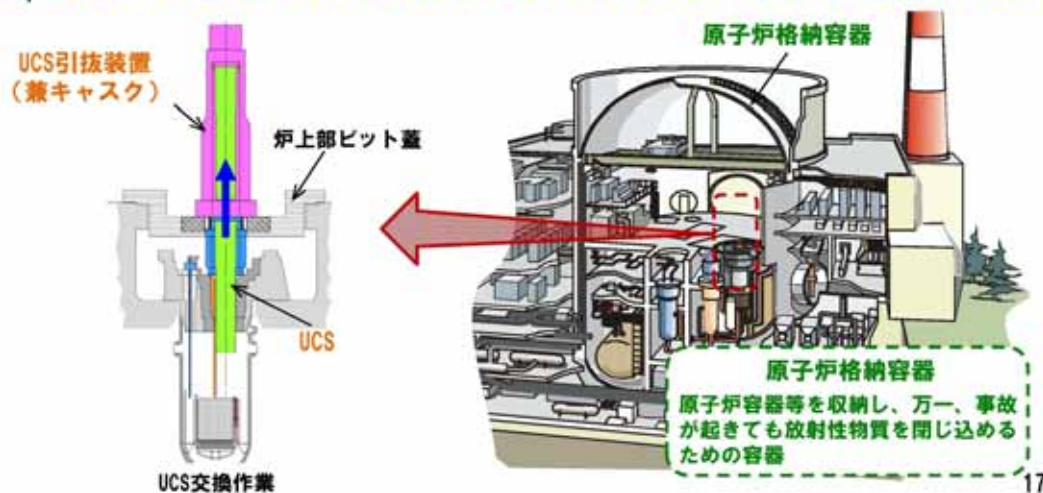
炉心上部機構（UCS）交換時等における 放射性物質の漏えい防止等について

16

放射性物質の漏えい防止等の対策について

- UCS交換作業等は、放射性物質等の放散防止のため、原子炉格納容器内で、密封容器（カスク）を用いて実施
- 作業中の放射性物質の漏えいの有無等をモニタにより確認
- 交換したUCSは、適切な遮へいを確保して保管

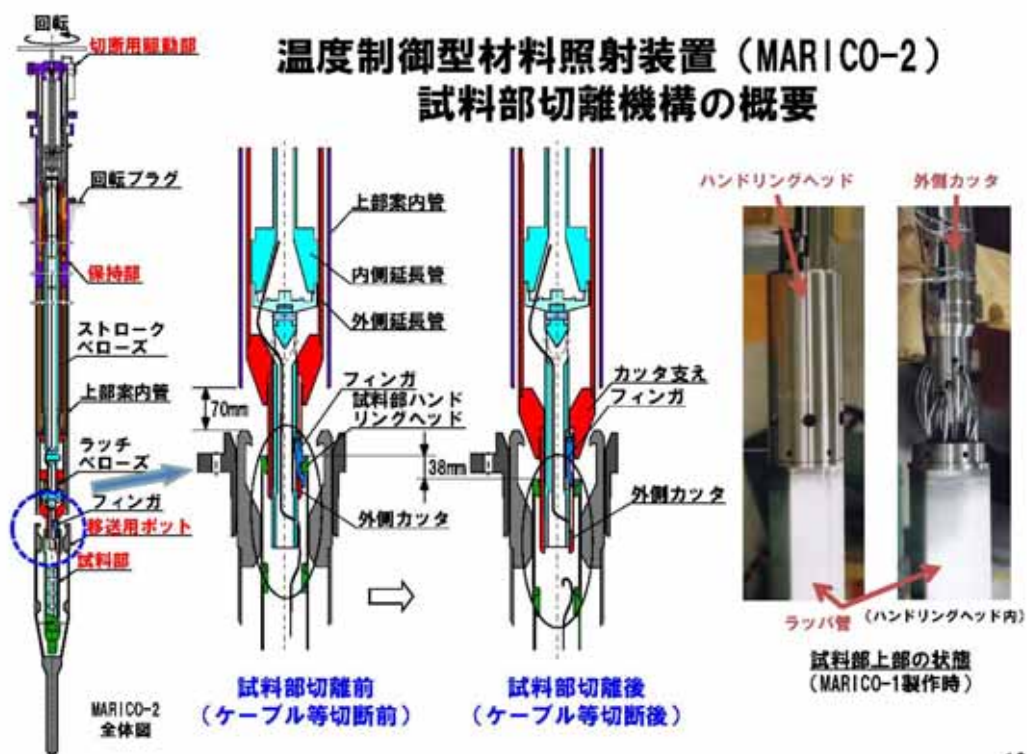
⇒ 外部への安全上のリスクが生じないように、十分な対策をとる



添付-4

トラブルの発生原因及び再発防止について

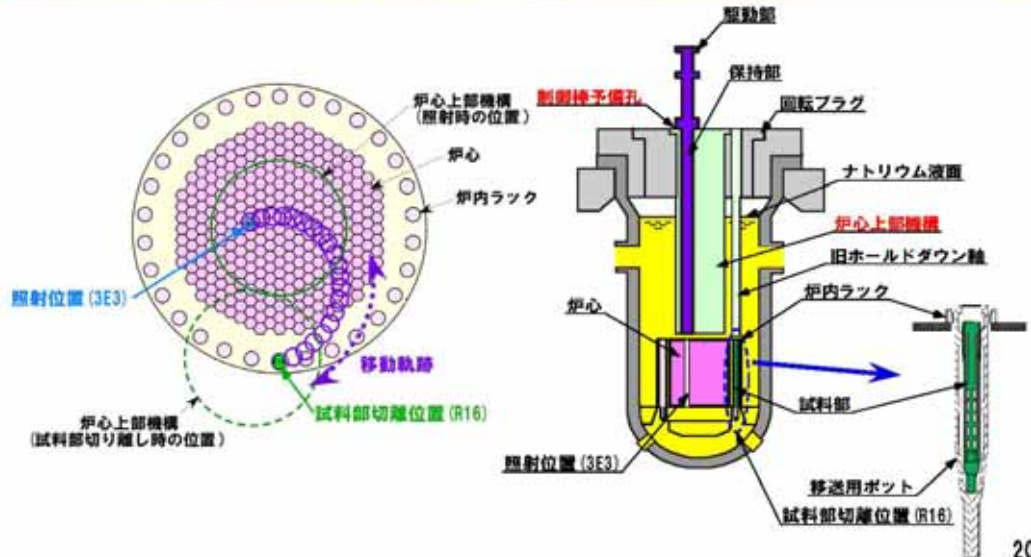
18



19

MARICO-2保持部の軌跡

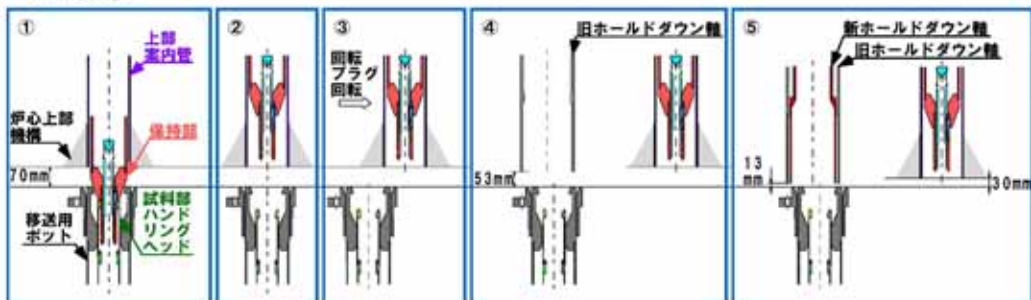
MARICO-2試料部は、炉心上部機構内に吊り上げられ、照射位置（3E3）より、試料部切離位置（R16）に移動される。試料部切離作業後、試料部は移送用ポットに収納され、保持部は、照射位置（3E3）に戻される。



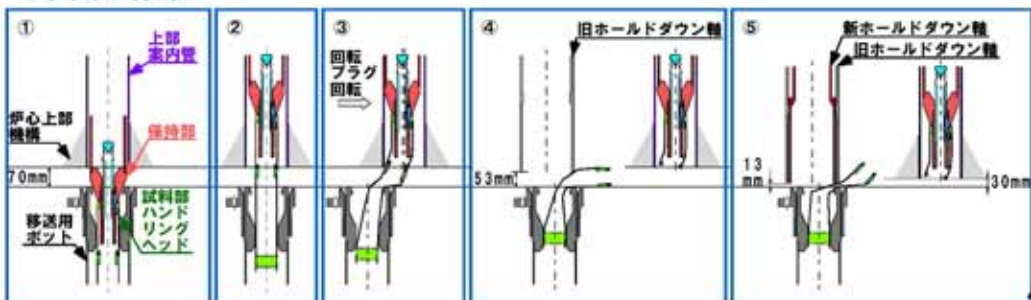
20

MARICO-2試料部切離作業時の事象進展

<正常時>



<今回の作業>



21

炉内ラック位置の干渉物の発生原因と再発防止策

<発生原因>

計測線付実験装置であるMARICO-2試料部切離機構の機能不全等起因し、試料部の切り離しに失敗したことが、本トラブルの直接の発生原因であり、原子炉本体のシステム等に問題はない。

<再発防止策>

計測線付実験装置を使用する予定はないが、今後使用する場合には、

- ① 試料部の切り離し機能の設計の見直しと、モックアップによる確認
- ② 試料部切り離し確認手法の多様化

により、再発を防止する。

<後続炉への反映事項>

本トラブルは、照射試験の遂行をミッションとしている「常陽」特有のものであり、当面、同様の設備を使用する予定のない「もんじゅ」や実証炉において、発生することはない。今後、同様の設備を使用する場合には、「常陽」の経験を反映させる。

平成 21 年 2 月 25 日

高速実験炉「常陽」に対するコメント

電事連 FBR 委員会

1. 常陽の果たしてきた役割と今後の役割

[果たしてきた役割]

国産技術による高速炉として、我が国の FBR 基礎基盤技術の蓄積、人材育成に大きな役割を果たしてきたと認識。

- ◆ 国産技術による高速炉の技術的成立性の実証
- ◆ 原型炉「もんじゅ」の設計、建設、運転に向けた Na 技術、炉心・燃料材料技術等、FBR 関連の基礎基盤技術の蓄積・修得

[今後の役割]

「もんじゅ」は運転開始後、当分の間(～10 年程度)は発電プラントとしての運転、保修の経験を積むことが必要であり、また、発電を行うため、常陽のような柔軟な活用は難しいと考えられる。今後の FBR 実用化を考えると、研究開発を主目的とした実験炉は必要と認識。

また、人材育成や産業界の技術基盤の維持のためにも実験炉の活用が必要。今後、人材育成の観点からも常陽へのニーズが高まることが予想。

- ◆ FBR 実用化に向けた新型の燃材料開発
- ◆ 限界照射試験、安全性試験
- ◆ オンライン・モニタリングを伴う照射試験
- ◆ FBR 関連の新技術実証試験
- ◆ 人材育成

2. 今後の常陽を考えるにあたってのポイント

- ◆ 常陽は発電設備を有しない実験炉であることから柔軟な運用性を有し、「もんじゅ」では果たすことの出来ない役割がある。
- ◆ 常陽には高速中性子照射場としての長い実績があり、海外炉にはない高精度の評価方法を確立。将来の FBR 実証炉、実用炉開発においても、例えば、高性能材料の開発のため、高精度の照射試験・評価を行い、適切

な設計仕様を設定することにより、安全性・経済性を向上させることができると考えられる。

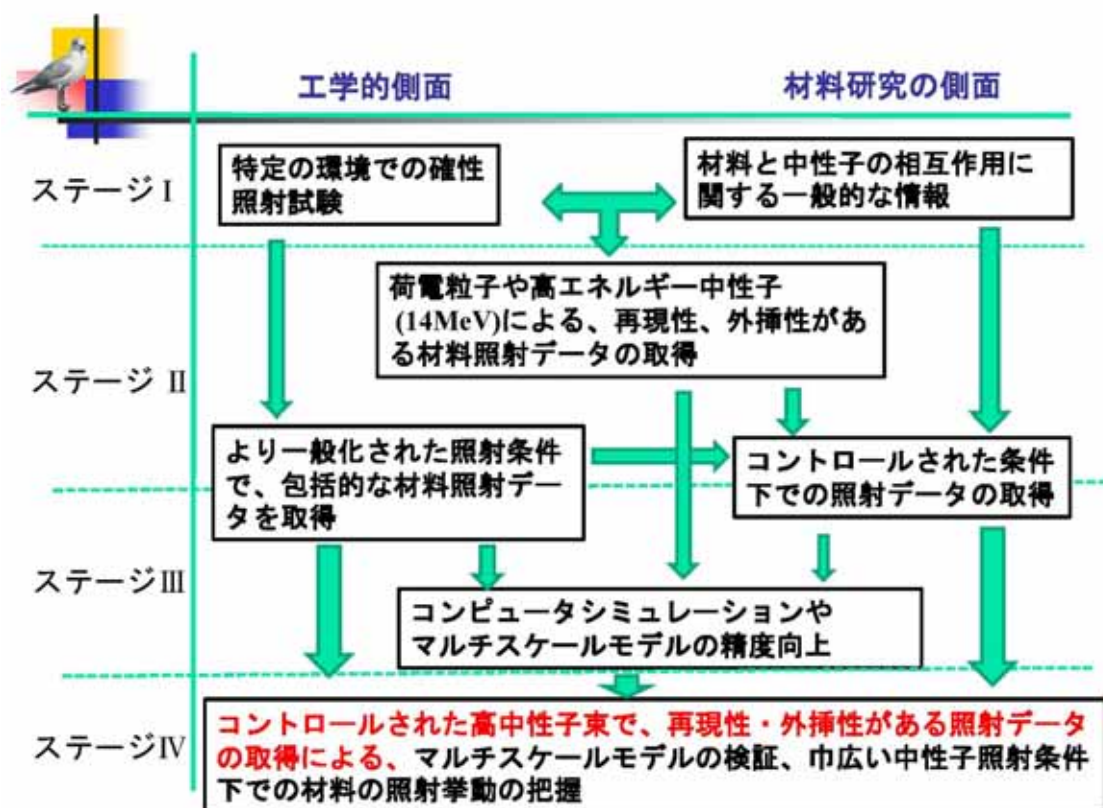
- ◆ 常陽やもんじゅの早期の運転再開は、我が国の FBR 技術を国際的に示す上でも重要。
- ◆ 補修に要する期間を踏まえると、当面、実用化研究開発で期待された照射試験には間に合わない部分があるとしても、将来の FBR 実用化に向けた研究開発施設としての役割は小さくないと考えられる。
- ◆ 原子力機構は、本検討会での議論を始め、常陽に対する社内外の期待を踏まえ、運転再開した場合に得られる成果と必要な費用等を分析・評価し、原子力機構の有する多くの研究プロジェクトの優先順位を経営的に判断した上で、適切に経営資源を配分することが求められている。
- ◆ なお、原子力機構は、常陽の運転再開のスケジュールを決めるに当たり、停止が長引くことによる FBR 開発への影響のみならず、社会、職員、地元等のステークホルダー全体への影響を考え、原子力機構全体の事業計画を踏まえつつも、可能な限り早期に運転を再開し、成果をあげることが求められている。

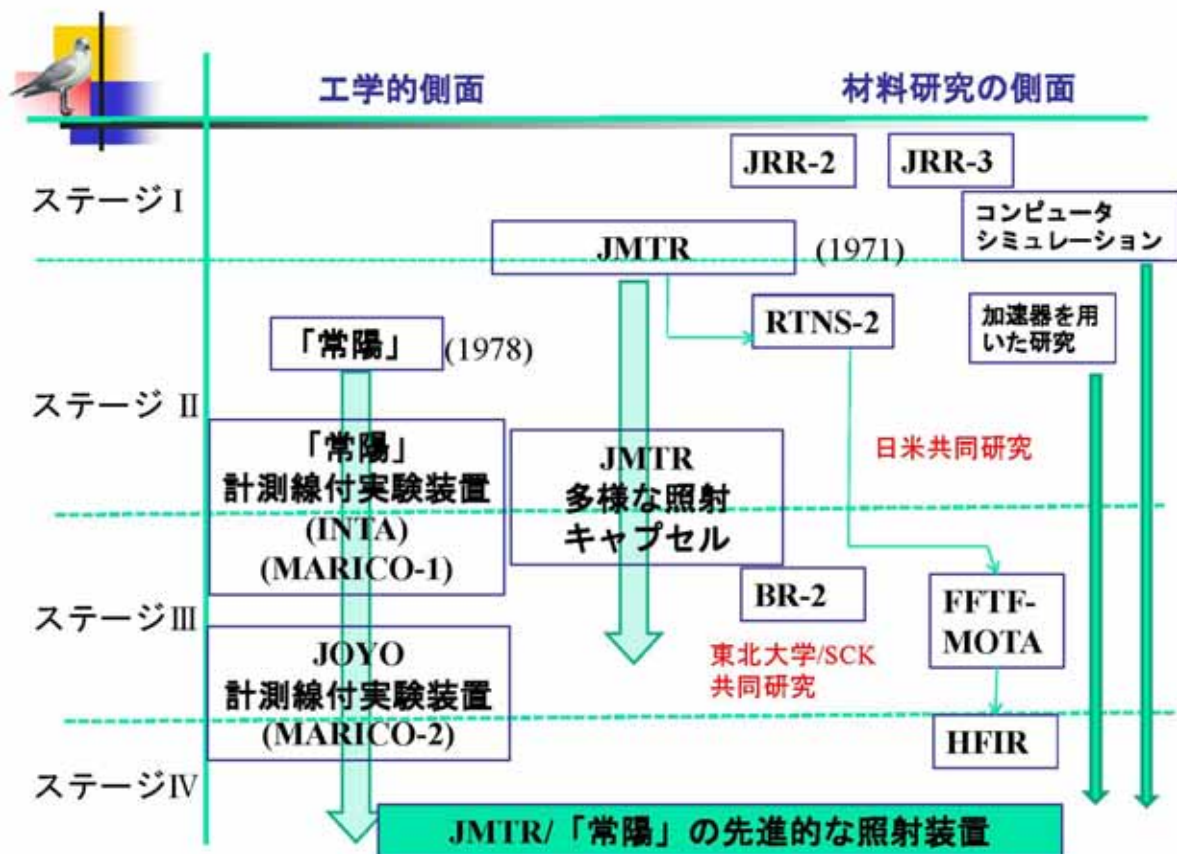
以 上



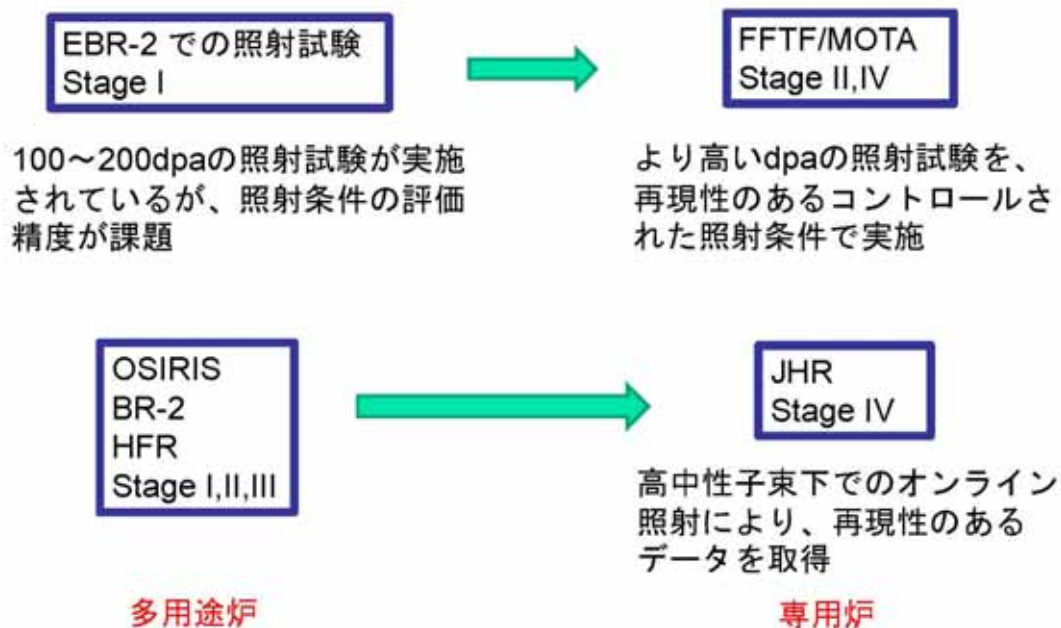
原子炉照射の考え方と 「常陽」の役割

四竈 樹男
東北大学
金属材料研究所





海外での材料照射試験の例



参考資料 「常陽」の概要

高速実験炉「常陽」は、我が国の自主技術で設計・建設そして運転が行われ、ナトリウム冷却型 FBR の基本性能の確認や運転保守経験の蓄積、新技術の実証など実験炉としての役割のみならず、高速中性子照射炉として数々の照射試験を実施し、「もんじゅ」を始めとする後続炉の開発に貢献してきた。「常陽」の概要を以下に示す。

1. 設備概要

「常陽」のプラント概念図（図 1 参照）に示すように、ナトリウムと直接触れる炉心や冷却設備、燃料の洗浄設備などの軽水炉と大きく異なるナトリウム冷却型炉特有の設備が数多くある。

原子炉本体（図 2 参照）は、燃料、制御棒よりなる炉心とそれを取り囲む反射体（またはブランケット）、炉心を支える炉心支持板、炉心上部構造等で構成され、これらは薄肉大口径の原子炉容器に納められている。原子炉容器の上部には回転プラグが置かれ、これに設けられた燃料交換孔を通じて冷却材ナトリウムの自由液面を覆うアルゴンガスのバウンダリを保持した状態で燃料交換が行われる。また、回転プラグ上部には制御棒駆動機構も設置され、炉心に挿入された制御棒を上下動させて原子炉を運転する。

「常陽」の炉心で発生した熱は、中間熱交換器を介して 1 次冷却系から 2 次冷却系に伝えられ、最終的に空気冷却器により大気に放散される。「常陽」の主冷却系は 2 ループで構成され、ナトリウムポンプ停止時の自然循環冷却能力を高めるため、ヒートシンクとなる空気冷却器をヒートソースである炉心および中間熱交換器より高所に配置している。ナトリウム機器・配管の腐食防止の観点から、ナトリウムの純度維持が極めて重要であり、ナトリウム冷却系にコールドトラップを設けて不純物を連続的に除去している。

2. マイルストーン

第 1 の目的である FBR に関する技術的経験の取得のため、1970 年 2 月に原子炉設置許可を受け、1977 年 4 月 24 日に増殖炉心(MK-I 炉心)で初臨界を達成した。その後、1979 年 7 月に 75MWt を達成して 1981 年末までに計 6 サイクルの定格運転を行い、プルトニウムの増殖性を確認するなどナトリウム冷却型 FBR に関する種々の貴重なデータと運転保守経験を蓄積した。

その後、第 2 の目的である燃料材料の照射試験を遂行するため、1982 年 1 月から約 10 ヶ月かけ照射専用炉心 (MK-II 炉心) に交換するとともに、約 180 体の径方向ブランケットをステンレス鋼反射体に置き換えた。1982 年 11 月 22 日に MK-II 炉心の初臨界を達成し、2000 年 6 月までに計 35 サイクルの 100MWt 運転を行い、照射試験を中心とする FBR 技術開発に供されてきた。この間の核燃料サイクル開発の象徴的な成果として、MK-I 燃料から取り出したプルトニウムを再び「常陽」に装荷して核燃料サイクルの環をつなぐことに成功したことが挙げられる。

2000 年 6 月の第 35 サイクル運転を最後に 18 年間にわたる MK-II 炉心での運転を終了した。そして、それまでの運転で蓄積した技術的経験と研究開発成果を基に「常陽」MK-III 計画を開始した（図 3、4 参照）。

3. 「常陽」のさらなる高度化（MK-III 計画）

MK-II 炉心の本格的な照射試験を開始した当時の我が国の FBR 開発の状況は、実証炉の設計・建設や実用化炉の仕様選定に向けて、コスト低減化や安全性向上等に関する課題が検討されていた。このうち、高燃焼度燃料の実証試験は、MK-II 炉心では 10 年を超える照射期間を要し、「常陽」の中性子束増大と稼働率向上が望まれていた。また、革新的技術の開発には、実機プラントでの開発実証が必要であり、「常陽」を活用した実証試験が検討されていた。

これらの要望を背景に、「常陽」を照射炉として世界最高の高速中性子束が得られるよう炉心およびプラントを改造し、革新的な新技術の実証試験を行う「常陽」MK-III 炉心での本格運転を 2003 年より開始した。照射能力を一層向上させるために炉心およびプラントを改造する MK-III 計画は、既存の原子炉の出力を 1.4 倍とした野心的な計画であり、燃料被覆管に改良オーステナイト鋼（PNC1520）、主中間熱交換器に 316FR 鋼といった新材料を採用する等、MK-III そのものが開発成果の実証の場となっている。

MK-III 炉心では、「もんじゅ」運転開始後の「常陽」の機能分担を視野に入れ、照射炉として性能向上を図るとともに、実証炉等で期待されるプラント概念や新技術の実機での実証と実用化の場に活用し、FBR 開発の中核として「常陽」のさらなる利活用を図ることを目的としており、今後、FaCT プロジェクト等に必要な照射データ等を提供するため、多種・多様な照射ニーズに応えていく計画である。また、世界でも数少ない高速中性子照射炉として、国際協力の下に 21 世紀の FBR 技術開発の一翼を担う重要な役割が期待されている。

型 式 : ナトリウム冷却型高速炉	1次冷却材ループ流量 : 1350t/h
熱出力 : 140MWt	2次冷却材ループ流量 : 1200t/h
冷却材 : ナトリウム	原子炉入口/出口温度 : 350℃/500℃
冷却系 : 2ループ	主冷却器入口/出口温度 : 470℃/300℃
燃料 : 混合酸化物	主冷却器空気流量 : 7700m ³ /min
除熱方法: 空気冷却(4基)	

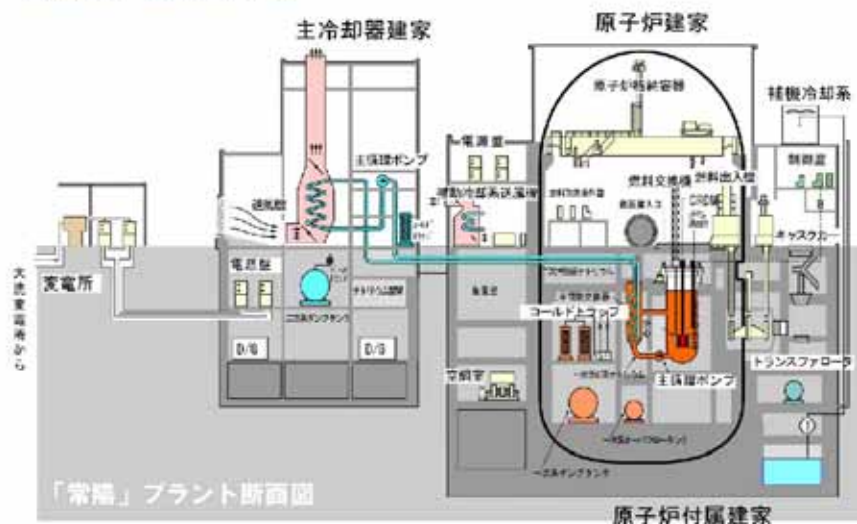


図1 「常陽」プラント概念図

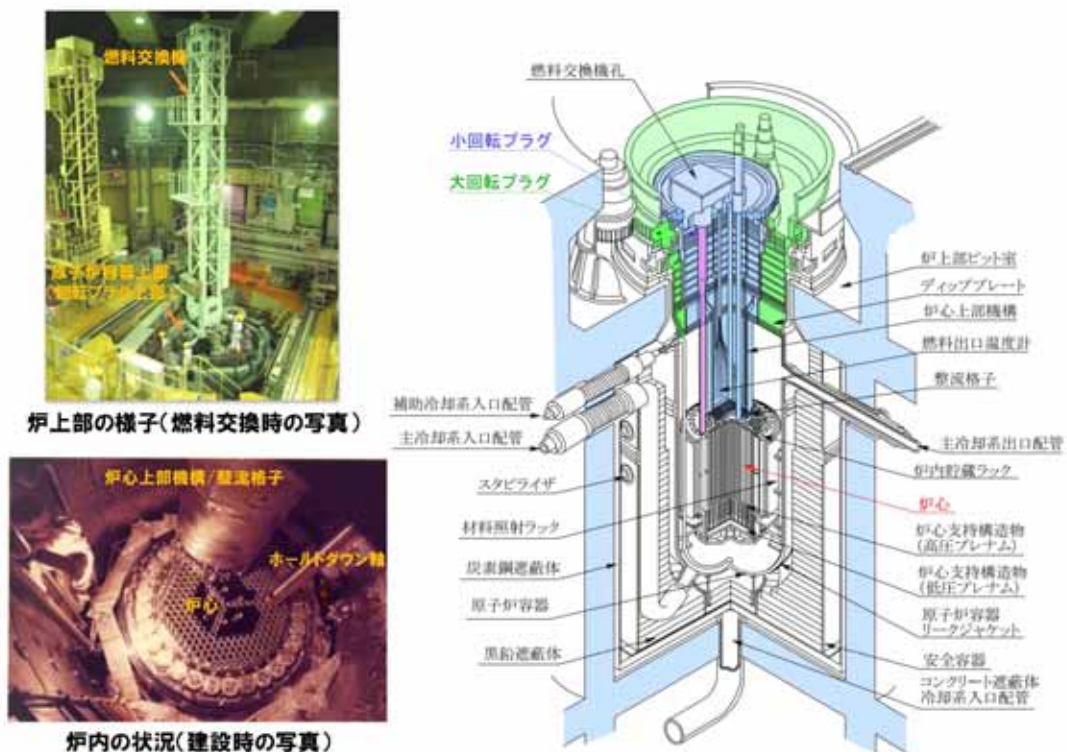


図2 原子炉本体概念図

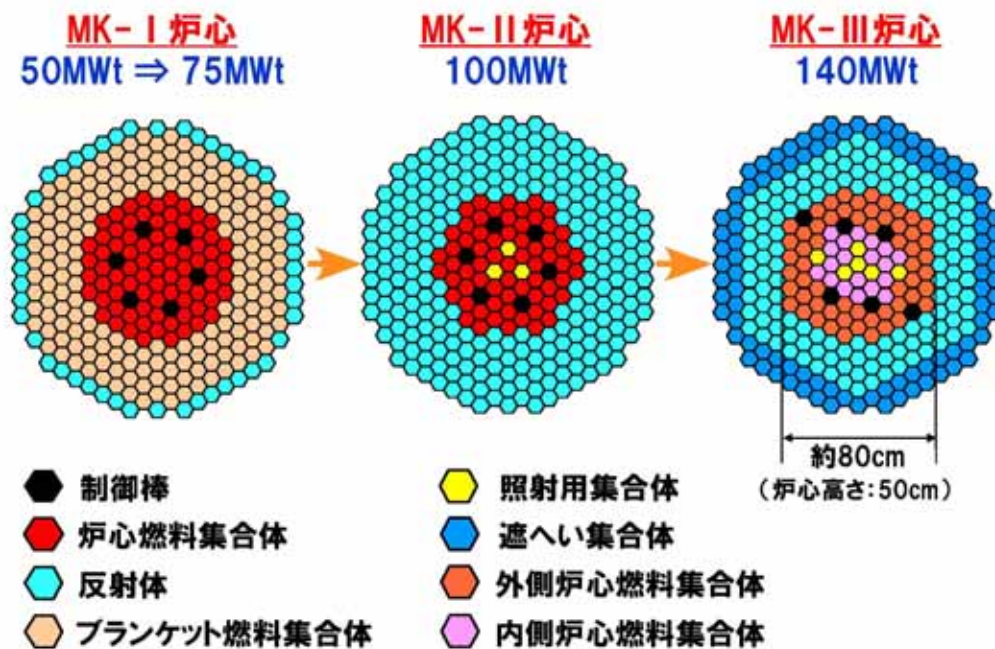


図3 「常陽」炉心高度化のあゆみ

項目		MK-I	MK-II	MK-III
原子炉熱出力	MWt	50/75	100	140
炉心燃料集合体の最大装荷体数		82	67	85
照射試験用集合体の最大装荷体数		0	9	21
炉心燃料領域等価直径	cm	80	73	80
炉心燃料領域高さ	cm	60	55	50
²³⁵ U 濃縮度	wt%	23	12 (J1)/18 (J2)	18
Pu 富化度	wt%	18	<30	<30
核分裂性Pu富化度 [(²³⁹ Pu+ ²⁴¹ Pu) / (Pu+U)]	wt%	—	~20	~16/21*
最大線出力密度	W/cm	230/320	400	420
炉内最大中性子束	全中性子束	×10 ¹⁵ n/cm ² ・s	1.9/3.2	4.9
	高速中性子束 (≧0.1MeV)	×10 ¹⁵ n/cm ² ・s	1.3/2.2	3.2
最高燃焼度 (要素平均)	GWd/t	25/42	50 (J1)/75 (J2)	90
1次冷却材流量	t/h	2,200	2,200	2,700
1次冷却材温度	原子炉入口	℃	370	370
	原子炉出口	℃	435/470	500

*外側燃料

図4 「常陽」主要炉心特性

用語解説

316FR（高速炉構造用 SUS316）：

高速増殖炉用構造材料として、低炭素窒素添加により、従来の SUS316 に比べて高温強度特性を改善したオーステナイト系ステンレス鋼。

GWd/t（giga-watt-day-per-ton）：

燃焼度の単位。MOX 燃料の単位重量あたりに発生した熱エネルギーの総量。炉心に装荷された核燃料が原子炉から取り出されるまでに中性子との反応により消費された割合を示す。

MA（Minor Actinide、マイナーアクチニド）：

周期律表において原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムに至る 15 の元素を総称してアクチノイド元素といい、このうちアクチニウムを除いたものをアクチニド元素という。使用済燃料中でウラン、プルトニウムに比べ存在量の少ないネプツニウム（Np）アメリシウム（Am）及びキュリウム（Cm）をマイナーアクチニドと称する。

MARICO-2（Material Testing Rig with Temperature Control、マリコ 2 号機）：

照射試料である被覆管等の材料を、一定温度で照射する実験設備。今回炉内干渉物となっているのは計測線付実験装置（温度制御型材料照射装置）の 2 号機で、MARICO-2（マリコ 2 号機）と称している。本装置は全長が約 11m あり、試料部、保持部、駆動部から構成されている。試料部は照射試料が装填され、炉心に挿入される部分である。保持部は炉心上部機構内にあり、試料部を保持するための爪や、照射試験終了後に試料部を切り離すためのカッター機構がある。駆動部は試料部を上下に移動させるためのものである。

ODS 鋼（Oxide Dispersion Strengthened フェライト鋼、酸化物分散強化型フェライト鋼）：

フェライト鋼の高温強度を改善するために、微細な安定酸化物粒子をフェライト鋼の中に分散させた材料。高燃焼度燃料被覆管として開発中である。

PNC-FMS：

原子力機構が開発した炉心材料用フェライト鋼。オーステナイト鋼に比べて耐スエリング性が格段に優れたフェライト系材料の特性を活かしつつ、高温強度の改善を図った材料である。主としてラップ管に適用する。

TRU（Transuranium、超ウラン元素）

原子番号がウラン（原子番号 92）より大きい元素。ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウム、キュリウム等の人工の放射線元素。

UCS（Upper Core Structure、炉心上部機構）：

高速炉の原子炉容器の回転プラグから炉心上部に吊り下げられ、遮へい部、胴、整流板、熱電対支持物等で構成される。燃料集合体出口での冷却材温度検出、制

御棒の所定位置への支持などの機能を持つ。

X 線 CT：

複数方向の透過 X 線データを計算機で処理することにより、断層画像を得るコンピュータ断層撮影方法。非破壊検査として、主に集合体内部状況調査に用いられる。

回転プラグ：

回転プラグは原子炉容器の蓋の役割を果たしているもので、「常陽」では、独立に回転する大回転プラグと小回転プラグが約 500mm 偏心して設置されている。大小それぞれの回転プラグの回転角度を組み合わせることにより、炉心及び炉内ラックの任意の位置に燃料交換機を移動させる仕組みとなっている。

カバーガス：

冷却材ナトリウムの酸化等を防ぐために、原子炉容器や主冷却系機器内のナトリウム液面上部の空間に満たされた気体であり、化学的に不活性なガスであるアルゴンガスが使用されている。

簡素化ペレット燃料：

経済性向上に向け、酸化物燃料粉末を取り扱うプロセスの合理化により、製造工程を簡素化して製作した酸化物燃料。

高速増殖炉サイクル：

高速増殖炉とその関連する核燃料サイクル（燃料製造、再処理）をいう。原子炉の中でできたプルトニウムは一度原子炉の外に取り出され、核分裂生成物などを分離した後、新しい燃料に加工される。

再臨界回避：

仮想的な炉心損傷時に、溶融した炉心燃料の集中等により再臨界が発生することがないように、初期に溶融燃料が炉心外に流出するような対策を講じること。

酸化物燃料（MOX 燃料）：

ウラン酸化物とプルトニウム酸化物を混合して作った燃料。

自己作動型炉停止機構（Self Actuated Shutdown System、SASS）：

炉内の異常な温度上昇時に、自動的に制御棒を切り離す受動的な安全装置。高温になると磁性を失う温度感知合金を制御棒の頂部に設置し、これを電磁石により保持する構造を有する。

主中間熱交換器：

1 次冷却系と 2 次冷却系の間に設置される熱交換器。

整流板：

燃料集合体等の出口冷却材温度を、できるだけ外乱なしに測定するために設けられた、ナトリウムの流れを整えるためのステンレス鋼製の板。炉心上部機構の下端に格子状に設置されている。

線出力密度：

燃料要素の単位長さ当たりの出力。単位は W/cm、kW/m 等が用いられる。

増殖比：

原子炉の運転に伴いウラン 235 やプルトニウム 239 などの核分裂生成物質が核分裂などで減少する割合に対して、ウラン 238、プルトニウム 240 などが中性子を吸収して核分裂性物質（プルトニウム 239、241 など）を生成する割合の比率をいう。その比が 1.0 を超える場合を増殖比、1.0 以下の場合を転換比と呼ぶ。

第 4 世代原子力システム：

米国エネルギー省（DOE）が 2030 年頃の実用化を目指して提唱した次世代の原子炉の一般的な概念。国際的な枠組みで推進するため、米国、日本、英国、韓国、南アフリカ、仏国、カナダ、ブラジル、アルゼンチン、スイスの 10 カ国と 1 機関（EU）が 2001 年 7 月に第 4 世代原子力システム国際フォーラム

（Generation IV International Forum：GIF）を結成し、現在までに 6 つの原子炉概念に絞って研究開発を進めていく計画である。

ハンドリングヘッド：

計測線付実験装置の試料部の上端にある外径φ78 mm×内径φ73 mm×長さ 195 mm の円筒形状の部品で、試料部の移送等を行う際には、この部分をつかむ。

ホールドダウン軸：

燃料交換機で炉内から燃料を引抜く際に、周囲の燃料と一緒に抜けないよう、抑えるための円管。ホールドダウン軸には、常時原子炉容器内に設置され、現在は案内管として使用している旧ホールドダウン軸と、これに代わって燃料交換機側に設置され、原子炉運転中は燃料交換機と共に取り外される、新ホールドダウン軸がある。

ラッパ管：

集合体の強度を保持するための六角形の外套管。高速炉の燃料集合体では、炉心内の燃料の体積割合を高めるため、燃料要素の配列を三角格子としており、ピン束の外形は六角形となる。

炉内ラック：

燃料集合体等の原子炉内での一時的な貯蔵・冷却や、材料の照射試験等を行う設備。炉心と同心の円周上に配置され、燃料集合体等を入れるポットを収納できる構造となっている。