

**FBRの運転・保守コスト低減に関する検討**  
**( 研 究 報 告 )**

2001年3月

核燃料サイクル開発機構

敦 賀 本 部

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1184,

Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

## FBRの運転・保守コスト低減に関する検討 ( 研究 報 告 )

穂村政道\*1, 山田文昭\*1, 森下喜嗣\*2

### 要 旨

FBRの経済性目標である将来の軽水炉に比肩できる経済性を達成するためには、炉の建設コスト、燃料サイクルコストと共に、運転保守コストの低減を図っていく必要がある。この観点から実用化戦略調査研究の一環としてもんじゅや軽水炉等のプラント運転保守経験および実証炉の設計をベースに、FBR実用化候補概念の運転保守コスト低減に向けた検討を行った。

運転保守コスト低減上特に重要な定検期間短縮方策を中心に、所内比率および保守・補修コストの低減策も検討を行った。もんじゅの設備点検実績や軽水炉の定検実績等を踏まえて、定検短縮の観点から設計に配慮すべき方策を抽出し、抽出した方策をナトリウム冷却炉の実用化候補概念に適用して定検工程を検討した。また、ガス冷却炉および鉛-ビスマス冷却炉の実用化候補概念について、ナトリウム冷却炉の定検工程をベースに設備の違いを考慮して定検工程を検討した。これら検討の結果、いずれも40～45日程度の軽水炉並の定検期間を達成できるポテンシャルがあることが分かった。

今後、この軽水炉並の定検期間が達成できることをもんじゅで運転保守実績を積みながら、裏付け、実証していくことが重要である。特に、上記定検工程の検討にあたっては、もんじゅの設備点検実績や機能試験結果を基に将来の合理化を見込んでいること、主要な作業項目を対象としており定検全体として細部の取り合いまで検討できていないこと、ナトリウムドレンを不要とできる検査技術等新技術が開発できることを前提としていること等から、もんじゅで定検実績を積みながら新技術の適用も含めて改善・合理化を進め、定検工程を合理化・短縮化できることを実証していくことが望まれる。

---

\*1 : 国際技術センター プラント利用技術グループ

\*2 : 現、国際技術センター 研修計画グループ

WBS 番号 : I-1-G-①～③

本研究は、実用化戦略調査研究の一環として実施したものである。

## Study on Reduction of Operation and Maintenance Costs

M. Akimura<sup>\*1</sup>, F. Yamada<sup>\*1</sup>, Y. Morishita<sup>\*2</sup>

### Abstract

To reduce electric generation cost of commercialised FBR, the target of which is equal to that of future LWRs, it is necessary to reduce not only plant construction cost and fuel cycle cost, but also operation and maintenance cost. From this point of view, the Study on Reduction of Operation and Maintenance Costs on candidate concepts for commercialised FBR was carried out based on analysis of operation and maintenance experience of Monju and latest LWRs and of design experience of demonstration FBR.

The most effective way to reduce the generation cost regarding operation and maintenance is to shorten the shutdown period for periodic maintenance, so it is a big task in this study how to shorten the period of FBR equal to that of LWRs. Measures to be reflected in the design to shorten the period were picked out based on analysis of maintenance experience of Monju and LWRs, which were applied to the design of sodium-cooled candidate FBRs to estimate perspectives of their maintenance periods. Regarding gas-cooled and lead-bismuth-cooled FBRs, their maintenance periods were estimated based on the period of sodium-cooled FBR considering differences in systems and equipment. The results of above study show that maintenance periods of all types FBRs have potential to be 40 to 45days which are nearly equal to that of LWRs.

In this study the maintenance periods were estimated on the premises that periods of some maintenance work items can be shortened based on analysis of maintenance experience of Monju, the scope investigated are limited to main maintenance work items, new inspection technology can be developed, etc. So it is desirable that above results should be substantiated by giving improved maintenance results at Monju in future.

---

\*1 : International Cooperation & Technology Development Center, Plant Utilization Group

\*2 : Present, International Cooperation & Technology Development Center, Training and Planning Group

## 目 次

1. はじめに .....	1
(1) 検討目的 .....	1
(2) 検討方法 .....	1
2. 運転・保守コスト低減に関する検討 .....	3
(1) 運転コスト低減に関する検討 .....	3
(i) 所内比率低減方策の検討 .....	3
(ii) ユーティリティの調査 .....	5
(2) 保守コスト低減に関する検討 .....	7
(i) 定検期間短縮に関する検討 .....	7
(ii) 保守・補修コスト低減に関する検討 .....	17
(3) 実用化に向けた運転保守コスト低減方策の適用性検討 .....	19
(i) ナトリウム冷却ループ型炉 .....	19
(ii) ナトリウム冷却タンク型炉 .....	26
(iii) 鉛-ビスマス冷却炉 .....	29
(iv) ヘリウムガス冷却炉 .....	38
(v) 炭酸ガス冷却炉 .....	41
(vi) もんじゅを用いた確立・実証が期待される実用化に向けた運転保守技術 .....	44
3. まとめ .....	64
(1) 運転コスト低減方策の検討 .....	64
(2) 保守コスト低減方策の検討 .....	65
(3) 実用化に向けた運転保守コスト低減方策の検討 .....	65
(4) 運転保守コスト低減のための課題と開発計画 .....	67
4. おわりに .....	69
5. 参考文献 .....	70

## 表リスト

表-1	所内負荷率の比較	48
表-2	ユーティリティ使用量の推定結果	49
表-3	実証炉（フェーズ2）の定期検査工程	50
表-4	実証炉ともんじゅの主要定期検査工程	51
表-5	ナトリウム冷却ループ型炉 定期検査工程	52
表-6	ナトリウム冷却ループ型中型モジュール炉 定期検査工程	53
表-7	ナトリウム冷却タンク型炉 定期検査工程	54
表-8	中型ナトリウムタンク型炉 定期検査工程	55
表-9	鉛-ビスマス冷却炉 所内負荷推定	56
表-10	鉛-ビスマス冷却炉 定期検査工程	57
表-11	ヘリウムガス炉 定期検査工程	58
表-12	炭酸ガス炉 定期検査工程	59
表-13	モジュール炉の標準定期検査パターン	60

## 図リスト

図-1	鉛-ビスマス炉の主炉停止系概念図	61
図-2	燃料集合体下部ラッチ機構概念図	62
図-3	燃料移送ポット内の自然循環流路	63

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下「サイクル機構」という）では、中長期事業計画（平成11年3月策定）に基づき、高速増殖炉(FBR)サイクルの完成に向け、1) エネルギー生産システムとして必要な経済性の向上、2) 資源の有効利用、3) 環境負荷の低減、4) 核不拡散性の確保を開発目標とし、システム全体としての最適化と実用性に留意しながらFBRサイクルの研究開発を実施することとしている。また、中期的には、安全確保を前提として、FBRサイクル全体で、軽水炉の燃料サイクルと比肩する経済性を達成するべく、その向上を図ることを最重要課題として取り組む方針である。

この方針を受けて、平成11年7月からFBRサイクルの実用化戦略調査研究（以下「実用化戦略調査研究」という）に本格着手した。

実用化戦略調査研究の検討フェーズは、軽水炉システムと比肩する競争力を確保する上で有望と考えられる複数のFBRサイクルの候補概念を具体化し、実用化に向けた開発シナリオを策定する第Ⅰ期と、工学的試験も含めて技術的成立性を確認して整合性を図ったシステムに絞り込む第Ⅱ期とで構成されている。

本報告書は、実用化戦略調査研究の第Ⅰ期において検討している各種炉システム概念の運転保守コスト低減に関する検討結果をまとめたものである。

### (1) 検討目的

FBRの経済性目標である将来の軽水炉に比肩できる発電コストを達成するためには炉の建設コスト、燃料サイクルコストと共に、運転・保守コストの低減を図っていく必要がある。このため、各種炉システム概念についてその運転保守コスト低減のポテンシャルを評価するとともに、開発課題を摘出・整理することにより、実用化戦略調査研究の第Ⅱ期に向けて、原子炉システムの候補概念を選定するための判断材料を整備することを目的とする。

### (2) 検討方法

原型炉「もんじゅ」、実験炉「常陽」、軽水炉等のプラント運転保守経験をベースに、ナトリウム冷却炉の運転・保守コスト低減方策を摘出する。特に、運転・保守コスト低減に当たっては、①稼働率の向上（定検期間の短縮）、②所内負荷率の低減が2つの大きな柱であるため、これを中心とした検討を行う。

これら検討により摘出した運転・保守コスト低減方策をナトリウム冷却炉実用炉候補概念に適用するとともに、ナトリウム冷却炉の検討結果をベースとして鉛-ビスマス冷却炉、ガス冷却炉について運転保守上の課題を摘出、検討する。

運転保守コスト低減方策の検討は、本社・FBRサイクル開発推進部、大洗工学センター・実験炉部及びシステム開発部、国際技術センターで運転保守ワーキンググループを構成すると共に、もんじゅの運転経験・設備点検実績を有するも

んじゅ建設所の協力を得て検討を進める。また、摘出した運転保守コスト低減方策の実用炉への適用については、システム開発部で実施の実用炉概念検討と協調を取りながら検討を進める。



## 2. 運転・保守コスト低減に関する検討

### (1) 運転コスト低減に関する検討

#### (i) 所内比率低減方策の検討

FBRの所内比率は、2次ナトリウム系があること、ナトリウムの凍結防止のため予熱が必要なこと、ナトリウムの温度が高いことから冷却のための換気空調系負荷が大きくなること等から、軽水炉のそれに比べて高くならざるを得ない。一方、FBRの熱効率はナトリウムの温度が高いことから逆に軽水炉のそれより高くなっており、同じ炉出力に対する送電端電気出力はFBRの方が高くなるので、所内比率が高いという理由のみでFBRが軽水炉より経済性で劣ると言うことにはならない。(因みに、軽水炉の所内比率を4.2%、熱効率を35%、FBRの熱効率を41%と仮定すると、FBRの所内比率は18%以下であれば、炉出力が同じ場合のFBRの送電端電気出力は軽水炉のそれを上回ることになる。別の言い方をすると、熱効率を1%上げるということは所内比率を2%強低減することと等価であると言える。従って熱効率の向上は送電端電気出力増加に有効な手段であるが、これについては別途検討されるのでここでは検討対象としない。)

しかしながら所内比率をできるだけ低くすることは、経済性向上に有効と考えられるので、その低減方策について以下の通り検討した。

#### (a) 所内比率の調査

もんじゅ、実証炉~~※~~及び軽水炉の所内比率は、表-1に示すとおり10.9%、5.9%（機械式2次主循環ポンプの場合5.6%）及び4.2%である。

実証炉の所内比率は、もんじゅのそれに比べてほぼ半減しているが、この主要因は建屋容積の縮小、補助ナトリウム系の合理化（ナトリウムオーバーフロー系、充填・ドレン系の削除、ナトリウム純化系の簡素化等）等によるものである。

実証炉の所内比率をみると、系統圧損や除熱容量等により負荷容量の決まる熱輸送系（1次・2次主冷却系及びタービン発電機設備）及び補機冷却系の所内比率で4.3%に達しており、軽水炉並の所内比率4.2%以下を達成することは難しい。因みに、2次系削除概念とすれば所内比率を1%程度低減可能である。

#### (b) 所内比率低減方策の検討

もんじゅの設備別各負荷率を1.0としたときの実証炉と軽水炉の各負荷率（電気出力で正規化した値）は、表-1の通りである。この表から分かるように1次主冷却系、タービン発電機設備及び補機冷却系統設備につい

ては、実証炉の負荷率は軽水炉のそれと同等である。前述のようにこれら設備の負荷容量は、除熱容量や系統圧損により決まるため、温度をあげて効率を上げるか、系統圧損を下げることであれば低減できる可能性はあるが、これについてはプラント概念を構築する中で構造健全性等を確保しつつ最適な系統設計がなされるのでここでは検討対象としないものとする。

実証炉においては上記の熱輸送系と補機冷却系の負荷で所内比率は4.3%を占めており、これを除く負荷は合計で1.6%である。更に、発電設備でない管理建物電源と電源損失（所内負荷合計の2%と仮定）分、建屋の容積で決まる照明電源分及び一時的にしか使用しない機器洗浄設備分の負荷0.4%を差し引くと残りは1.2%となる。従って、実証炉の所内比率から更に大幅な低減は難しいと言える。

この残り1.2%の殆どは、換気空調設備(0.8%)、燃料取扱設備、計装電源設備、予熱ヒータ設備である。特に実証炉の換気空調設備は、軽水炉の10倍となっており、低減が望まれる。以下これら設備の負荷低減方策について検討した。

#### ① 換気空調設備

換気空調設備の合理化の要点は、

- a. 建屋容積・面積削減
- b. 各室内許容温度増大
- c. 配管長低減、電源盤等発熱源の減少
- d. 保温材の性能向上、保温厚さの増加、適正化
- e. ナトリウム補助設備の削減

等であり、もんじゅでの設計と実績との差異をベースとした設計余裕を適切に保った設備設計とすることにより低減の余地があると考えられるが、プラント概念に依存するため次年度プラント毎に適用方策を検討するものとする。

#### ② 燃料取扱設備

実証炉の燃料取扱設備負荷の3/4は、炉外燃料貯蔵設備で占められており、メーカー提案にもあるように使用済燃料の直接取出方式を採用してこれを削除すれば、所内比率は0.1%低減される。

#### ③ 計装電源

計装電源設備の負荷を低減するには、計装の数を減らすことが端的な方法であり、具体的にはループ数の削減が考えられるが、これについては建設費低減の観点から別途検討されている。将来的には、光ファイバーによる計装設備のスリム化の可能性はあるが、現時点ではその適用性

も含め未知数である。

④ 予熱ヒータ設備

予熱ヒータ設備合理化の要点は、

- a. ヒータ発熱密度の増加による本数削減
- b. 放散熱量補正係数の適正化
- c. タンク等下部へのヒータブロック集中化によるヒータブロック数の削減（昇温後に作動するのは下部のヒータブロックのみ）
- d. SG予熱に対する補助蒸気の利用
- e. 主冷却系等基本的に初期ナトリウム充填時にしか使用しないものへのガス予熱の適用（ガス予熱の場合、初期充填時仮設設備で予熱することにより本設設備を削減することができ、かつ定検時の点検対象の削減となる）

等であり、もんじゅでの設計と実績との差異をベースとした設計余裕を適切に保った設備設計とすることにより低減の余地があると考えられる。

(ii) ユーティリティの調査

もんじゅの運転に必要でありかつ軽水炉と異なる主なユーティリティは、アルゴンガス、窒素ガス、軽油である。

もんじゅは、平成7年11月8日の原子炉起動から同12月のプラントトリップ試験まで、40%出力で連続運転された。もんじゅでは、月単位でガス、軽油等のユーティリティ使用実績を取りまとめてきており、この結果をもとに運転中のユーティリティ使用量を下記の方法で推定した。

(a) 使用した実績データ

① 平成7年11月度：停止？ 運転（40%出力）

11月7日の起動後、初めて所内変圧器に切り替えて一月の70%以上を一定出力運転していることから、運転中のユーティリティ所要量を見積もるのに適していると考えられる。

② 平成7年9月度：運転？ 停止

9月5日の原子炉停止後、一月の80%以上を停止状態としており、停止時のユーティリティ所要量を見積もるのに適していると考えられる。

(b) 概算方法

各月における原子炉状態とユーティリティの使用実績の概要は表-2に示す通りである。各ユーティリティの運転中と停止中の所要量はそれぞれ一定であると仮定し、9月および11月の使用量実績から運転中および停止

中の1日当り所要量を求め、月当りの量に換算した。

(c) ユーティリティ所要量の推定結果

以上の方法により推定したユーティリティ所要量を、運転中(40%出力)および停止中に分けて表-2に示す。

① 軽油(補助ボイラ)

運転中は、停止中の約10倍の軽油を消費する推定結果となっている。この結果は、運転中消費量を一定と仮定して求めたものであることから均一化されているが、特に起動時にはSG等の蒸気予熱や給水加熱等のために2缶の補助ボイラが集中的に軽油を消費する。定常的には、空調用蒸気、液体廃棄物系の廃液濃縮用、ArやN<sub>2</sub>ガスの気化加熱用等に消費される。

なお、プラントの通常運転時にはプラントトリップ時のSG管板熱過渡緩和等のため1缶のボイラを継続運転するが、出来るかぎりタービン抽気を利用する設計となっている。

運転コスト低減の観点からは、通常運転時の所要蒸気は全てタービン抽気で賄うのが望ましく、ツインプラント構成を採ることによってプラント停止時の所要蒸気を隣接プラントの抽気で賄う設計とすれば、基本的に軽水炉と同様の消費量とできる。

② 軽油(ディーゼル発電機)

3台存在するディーゼル発電機に対して、1台当り1回/月の頻度で実施するサーバランス試験の際に消費される。表-2に示す消費量は、11月の試験実績回数(2回)で除算し、一回当りの消費量として推定した結果である。基本的に軽水炉と同じく通常運転中は、試験時のみ運転されるので軽水炉との差はない。

③ アルゴンガス

推定結果では、運転時は停止中の約2倍のアルゴンガスを消費する。1次系のカバーガス圧力は、停止中と運転中でそれぞれ低圧モードおよび高圧モードで一定の圧力に制御されており、ガス中のNaミストトラップ、ベーパーラップ、放射性希ガスの吸着、浄化を経て再循環して使用される。この際、ナトリウム温度の変化によるガス体積変化については、余剰分は気体廃棄物処理系を経て廃棄され、また不足分は供給系から補給されることにより圧力を一定に保つ。また、表-2の推定結果には含まれないが、ナトリウムのドレンおよび充填の際にはアルゴンガスを消費する。従って、通常定検においてナトリウムドレンをする必要

のない設計とすることが望ましい。

#### ④ 窒素ガス

推定結果からは、運転中および停止中ともに同量の消費量となっている。主に主冷却系の窒素雰囲気部等に使用されることから、点検等で人が立入る際には空気置換のために消費される（表-2 の推定結果には含まれていない）。尚、実証炉の設計のようにナトリウム配管等を配管、エンクロージャ等で覆って2重化し、窒素雰囲気部の容積を削減すれば消費量は大幅に削減できると考えられる。

### (2) 保守コスト低減に関する検討

#### (i) 定検期間短縮に関する検討

ナトリウム冷却炉の定検期間短縮の検討に当たっては、常陽の定検実績、軽水炉の定検実績及びもんじゅの使用前検査実績、設備点検実績を踏まえて策定された定検の計画工程をベースとして、電力で検討されている実証炉の定検計画の妥当性を評価すると共に、ナトリウム冷却FBRの定検工程の目安と設計上配慮すべき事項、必要な開発課題を抽出した。

#### (a) 定検工程に関する調査

##### ① もんじゅの定検工程の調査

高速増殖原型炉「もんじゅ」は日本初の高速増殖発電炉であり、その定検においては、燃料にプルトニウム、冷却材にナトリウムを使用し、送電系統に連係した発電を行うなどの「もんじゅ」の特徴を考慮した検査項目、内容、周期等を選定する必要があると考えられる。

しかしながら、「もんじゅ」の実機設計の段階では、定検工程に係る十分な検討はなされておらず、また試運転段階であり定検の経験も無いことから、定検工程の最適化が完了していない。

このような状況にあって、標準的な定検工程パターンについては「もんじゅ」の再起動に向け、起動前までに策定することとして、現在検討がなされている。

現在までの実績を踏まえた机上の検討結果では、

- ・ 現状レベルで実現可能な、燃料交換を含む標準定検工程期間として118日、
- ・ 更なる定検工程の短縮を目指して、プラント運用条件、設備の改善、予備機の確保等、さまざまな対策を施すことを前提に、当面の目標定検工程期間として90日、

という結果が得られている。

また、今後の運転・保守経験の積み重ねや設備の高度化を反映し、将来的には更なる定検工程の短縮に向けた検討も実施する必要がある。

a. 定検工程策定上の前提条件

上記もんじゅの定検工程 118 日策定に当たっての前提条件は以下の通りである。

(作業体制等)

- ・ 燃料交換作業（準備、後片付け含む）のみシフト作業とし、その他の作業は日勤作業ベース（10時間/日程度）
- ・ 制御棒駆動装置（CRD）駆動部、1次・2次主循環ポンプの軸封部等の点検は工場に持ち帰って実施

(プラント条件)

- ・ 崩壊熱除去ループをメンテナンス中も2系統確保（電源系、補機冷却系等含む）
- ・ 1次、2次共主冷却系点検時当該ループNaをドレン
- ・ 2本以上の制御棒引き抜きは行わない
- ・ 燃料交換作業は、炉停止10日後以降
- ・ 燃料交換時及び制御棒駆動機構点検時炉容器Na液位を通常運転時液位（NsL）に維持
- ・ 1次系ドレン時は、炉容器Na液位を最低液位（SsL）に維持

b. 定検のクリティカルパス

上記前提条件の下に策定された第1段階のもんじゅ目標標準定検工程 118 日のクリティカルパスは、以下の通りである。尚、右欄括弧内は、作業を全てシフト体制で実施した場合の日数を示す。

(シフト作業化)

・ CRD作動試験	4日	(2日)
・ CRD取外し	8日	(4日)
・ 1次主冷却系本格点検（A系）	29日	(21.5日)
(ドレン/点検/予熱/充填)：(2/15/10/2)		(2/7.5/10/2)
・ 燃料交換準備作業（シフト作業）	5日	(5日)
・ 燃料交換作業（シフト作業）	15日	(15日)
・ A系ポンプポニーモータテストラン	2日	(1日)
・ 1次主冷却系簡易点検（B系）	23日	(18.5日)
(ドレン/点検/予熱/充填)：(2/9/10/2)		(2/4.5/10/2)
・ B系ポンプポニーモータテストラン	2日	(1日)
・ CRD据付	10日	(5日)

・ CRD性能試験	10日	(5日)
・ 昇温	2日	(2日)
・ 起動試験 (炉特性試験)	8日	(4日)
	合計 118日	(84日)

但し、本工程は燃料交換作業を除き日勤作業ベースで策定されているため、軽水炉のようにクリティカル作業をシフトベースで実施すれば少なくともナトリウムのドレン・予熱・充填及び昇温作業を除く作業期間は半分に短縮されるので、軽水炉と比較する場合には118日ではなく右欄の84日と考えるのが妥当である。尚、炉特性試験については、性能試験中（使用前）のこれに相当する試験に、シフト体制で7日を要している。しかし将来的には、測定及びデータ整理の合理化・自動化により、計画工程並（日勤ベースで8日）で実施できると想定した。

#### c. 定検工程短縮の検討状況

もんじゅの定検工程については、平成5～7年度にかけて標準的な定検工程とその短縮化に向けた検討がなされたが、最終段階で2次ナトリウム漏洩事故が起こったため、その後詳細な検討は中断されている。

平成7年度末までの検討結果によれば、定検期間を第1段階の目標標準工程である118日（1次主冷却配管ISIを考慮した最長のケース(1回/3定検)は130日）から段階的に90日に短縮していくための方策及び課題として以下の項目が摘出されている。

- ・ CRD駆動部取外し・据付作業と1次主冷却系作業の並行作業化（CRD駆動部点検作業時の炉容器液位NsL維持条件の排除対策要）
- ・ CRD点検内容見直し（性能試験の合理化含む）及び予備機保有による点検作業期間の短縮
- ・ 中間熱交換器の2次側高圧維持条件の緩和による2次系作業の柔軟化、独立化
- ・ 1次主循環ポンプの軸封部予備品具備による点検期間の短縮
- ・ 炉容器計装の点検、交換作業の詳細化（クレーン、エリア利用計画の具体化等）
- ・ 蒸発器及び過熱器用のラブチャーディスク交換周期延長と交換時間の短縮
- ・ 非常用ディーゼル発電機、海水ポンプ点検期間の短縮
- ・ ポーラクレーンの高速化
- ・ 点検用仮設設備の常設化

その他、定検短縮の観点から、新規プラントの設計に当たって考慮しておくべき事項としては、以下のものが考えられる。

- ・ もんじゅの目標標準工程をみると、1次主冷却系点検のためのドレン/予熱/充填作業に28日を要している。軽水炉と同等とするためには、こういった作業を排除できる設計とする必要がある。特に、2次系については、SG伝熱管ISIと共にSGのラプチャーディスク交換作業について配慮が必要となる。
- ・ 建屋クレーンやオペフロの取り合い調整の限界が定検期間短縮を妨げる要因となることが十分考えられるため、設計段階から仮置き・点検スペースの割り振り、クレーンの増設可能性を考慮しておく必要がある。
- ・ もんじゅでは構造等の異なる3種類のCRDが採用されており、取扱い工具も3様で作業の調整等に時間を要している。工程短縮の観点からは取扱い工具、方法は同一のものが望ましい。
- ・ CRDバックアップシール交換は、狭い空間で長尺の取扱い工具での作業であり、CRD駆動部の短尺化等改善が必要である。
- ・ ラプチャーディスク等点検・交換することが明らかなものについては、交換作業が容易にできる場所や足場等を工夫する必要がある。

#### d. 更なる定検短縮に向けた検討課題

上記もんじゅの定検短縮方策の検討は、実証炉で考えられているようなナトリウムを基本的にドレンしないで定検を実施するといった抜本的方策を取り入れたものではない。一方、FBR実用化に向けて定検工程を短縮するためには、これらの抜本的対策を取り入れることが必須と考えられる。このため、これら対策を取り入れたもんじゅの定検短縮の可能性とそのために必要な検討課題について以下の通り検討した。

まず、118日工程を前提にして、

- ・ 主冷却系のドレンをしなくても定検可能
- ・ クリティカルになる作業はシフト体制で実施

とすると、既にシフト体制としている燃料交換作業(20日)と昇温(2日)を除く $118 - 20 - 2 = 96$ 日はシフト体制の適用により半分の48



日となり、合計 70 日の定検工程が達成できることになる。この日数は第 1 世代の軽水炉の定検日数と同程度であり、基本的にナトリウムドレンを必要とすることが FBR の定検を長くする大きな要因であることが分かる。

又、この日数は CRD 駆動部、主循環ポンプの軸封部予備品のローテーションパーツ化、燃料交換作業の効率化等を図れば、更に短縮できる余地がある。

一方、海水ポンプの角落とし（防汚塗装）作業等がクリティカルとなる可能性があるが、軽水炉並の期間で実施できればクリティカルとならないので設備改善の必要はあるかもしれないが、クリティカルから外すことができると考えられる。

次に、主冷却系のナトリウムドレンを不要とできるかについてであるが、もんじゅで主冷却系のドレンを必要とする理由は、

- ・ 窒素雰囲気室（原子炉容器室、1 次冷却系設備及び 1 次補助 Na 系設備の各室）を空気置換する（人が立ち入る）必要がある場合ドレンする
- ・ I S I 等作業実施のために当該部の温度を下げる必要がある場合（I S I 装置の耐熱温度からの制限がある等）ドレンする
- ・ I S I 等作業実施に当たって人が接近する必要（保温の取り外し、I S I 装置のセット、直接目視検査等）があり、雰囲気温度及び線量率を下げる必要がある場合ドレンする
- ・ 小口径配管の凍結防止のためドレンが必要で、かつ主系のドレンをせざるを得ない場合ドレンする
- ・ I H X の 2 次側を 1 次側より高圧に維持するため、原則として 2 次系をドレンする場合 1 次系もドレンする（I H X の漏洩がないことを液位監視等により確認できる場合は除外できる）
- ・ 電源系の点検をする場合、ループの監視できない状態が生ずるのを避けるためドレンする（ドレンが望ましいが必須ではないと考えられる）

であり、

具体的作業としては、

- ア. 1 次主冷却系作業の内、ドレンを必要とするものは
  - ・ 1 次主配管の体積検査（1 回 / 3 定検）
  - ・ 1 次主配管の目視・遠隔目視検査（1 回 / 3 定検）

上記2件については、3定検に1回であるがドレンが必要となる。標準定検で実施する項目で主冷却系のドレンを必要とするものはないと思われるが、主冷却系をドレンせずに補助ナトリウム系の必要なドレンがすべてできるかについては今後検討しておく必要がある。

イ. 2次主冷却系作業の内、ドレンを必要とするものは

- ・ SG伝熱管の体積検査  
(高温用伝熱管体積検査装置があれば不要)
- ・ 蒸発器・過熱器ラプチャーディスク交換

2次主冷却系については、蒸発器・過熱器のラプチャーディスク交換のためドレンする。この場合工程上のクリティカルに挙がってくることになる。設備点検での最短実績から推定すると46日かかるので定検工程は5日延びることとなる。

e. その他

以上主冷却系のドレンについて検討してきたが、主系のドレンをしない場合には、ドレンを必要とする補助ナトリウム系の作業がクリティカルとなる可能性があるので、これについても詳細に詰める必要がある。

② 実証炉（フェーズ2）の定検工程の調査

a. 定検項目の選定

先行FBR（「常陽」等）における定期検査項目の考え方を参考として軽水炉の定期検査と同等となるよう定検項目を設定している。結果としてもんじゅで設定したものと設備の違いを除き、ほぼ同じものとなっている。

b. 定検工程策定上の前提条件

(作業体制等)

- ・ クリティカル作業については全てシフト作業
- ・ CRD駆動部、主循環ポンプ軸封部等はローテーションパーツとして予備品を準備
- ・ 定検期間中は炉停止時のみ実施可能なものに限定

(プラント条件)

- ・ 炉停止1日後以降直接炉心冷却系で冷却
- ・ (炉停止60時間後以降1系統の自然循環で除熱可)

- ・ 1次、2次共主冷却系のドレンはしない
- ・ 1次主循環ポンプのデッキ上面へは、炉停止 10 日後以降立入可
- ・ 燃料交換作業は、炉停止 30 日後以降可
- ・ ナトリウム液位は成り行き
- ・ 下記の装置が実用化されている
- ・ 原子炉容器 I S I 装置
- ・ 炉内構造物 I S I 装置
- ・ 高温用 S G 伝熱管体積検査装置

c. 定検のクリティカルパス

実証炉の定検工程は、表-3 に示す通りであり、そのクリティカルパスを以下に示す。

・ 1次主循環ポンプデッキ上面への立ち入り減衰待ち (内、ポンプ点検準備、解線 3日)	10日
・ 1次主循環ポンプメカニカルシール点検(交換)	19日
・ 燃料交換、後始末	10日
・ 格納容器ハッチ漏洩試験	2日
・ CRD性能試験	3日
・ 出力上昇(炉特性試験)～並列	1日
	合計 45日

(b) 定検工程短縮に関する検討

① もんじゅの実績をベースとした実証炉定検工程の妥当性

実証炉の定検項目のそれぞれについてももんじゅの点検実績からその妥当性をチェックした結果を表-4 に示す。この内、クリティカル項目についての検討結果は以下の通りである。

a. 1次主冷却ポンプのメカニカルシール交換(21日;内クリティカル19日)

もんじゅでの実績では、アイソレ/ケーブル取り外し～工場点検～モータカップリング完了までの実績が、日勤ベースで30日(内、工場点検14日)である。

実証炉がもんじゅと異なる点は、

- ・ ポンプが大型化していることと
- ・ シフト作業としていること
- ・ 工場持ち帰りをなくして、メカシールを予備品と交換するのみとする(もんじゅの場合、工場点検の14日と並行して実

施している現場での部品手入れ、フラッシング等作業のための10日程度となる)

ことである。従って、もんじゅの実績にシフト作業を取り入れれば、13日程度の作業と考えられることから、実証炉の計画日数内での点検実施は可能であり、むしろ短縮できる余地があるといえる。

b. 燃料交換、後始末 (9.5日)

燃料交換作業については、もんじゅのSKSの実績では1体当たり90分かかっているが、燃料交換機側作業と燃料出入機側作業の完全並行作業化、回転プラグの高速化、コンピュータ機能の向上による機器作動指令時間の短縮等を図ることにより、1体当たり50分程度に短縮できると考えられるが、それでも8.5日は要すると考えられる。

また、燃料交換後始末作業については、燃料交換機輸送キャスク及びプラグ取扱機の増数による並行作業化、配置の工夫、横倒し作業の排除等合理化が図られているが、もんじゅの7割程度の70時間(3.5日)はかかると考えられる。

従って、合計12日程度は要すると推定される。

c. 格納容器ハッチ閉・漏洩試験 (2.5日)

格納容器ハッチ漏洩試験そのものは、シフト作業で2日も要するとは考えられないが、並行実施するDG自動負荷試験、DRACS自動起動試験は官庁立会になると考えられるので、2日をみておくことは妥当。

d. CRD性能試験 (3日)

CRD性能試験は、CR全数のラッチ・デラッチ(位置ゼロ調整、結合・切り離し等)、常駆動試験(インターロック含む)、スクラム試験を行うものである。もんじゅに比べて実証炉の設計はラッチ・デラッチ操作が容易になっているが、もんじゅで現在計画している内容を1本ずつ詳細に全て実施すれば、倍程度の期間を要することになる。

実証炉並の期間とするためには、交換した制御棒のみ詳細な試験を実施しそれ以外の制御棒の試験は最小限とする、複数の制御棒の試験を並行して実施する、一部のインターロック試験を炉特性試験時に実施する等の工夫が必要。

e. 炉特性試験 (1日)

軽水炉の実績でも2日。特に、最小停止余裕及び過剰反応度測定検査が官庁受検項目となるので最低でも2日要。軽水炉でも当初4日から実績を積みながら2日に短縮しており、FBRでも同様の合理化努力が必要。

以上を総合すると1次主循環ポンプ点検期間が短縮される余地があるが、燃料交換期間等が長くなると考えられ、結果的に45日程度に収まることから、実証炉の工程は概ね妥当といえる。但し、官庁検査のための日程調整について検討する必要がある。

## ② ナトリウム冷却FBR定検工程の目安の検討

FBRの定検工程を支配しているのは、基本的に燃料交換作業である。軽水炉の燃料交換は水中を燃料移動させるため除熱上の問題がないが、FBRの燃料交換作業は、燃料をポットに入れて炉外に取り出すのでその除熱のため燃料取扱系の冷却性・多重性が要求される。この燃料取扱系の設計を合理化するため、燃料交換作業は基本的にできるだけ燃料の発熱が小さくなる定検工程の後半に持っていくことが望ましい。

この観点から、燃料交換作業以降の工程については、燃料交換後に実施する必要がある以下の作業・試験のみを実施することになる。

- ・ 格納容器ハッチ閉・漏洩試験（非常用DG自動負荷試験、炉心冷却系自動起動試験等並行実施）
- ・ CRD性能試験
- ・ 起動試験（炉特性試験）

一方、燃料交換までに終えておく必要がある主要作業としては以下がある。

（燃料交換開始以降、格納容器内立ち入り不可となるため）

- ・ 炉上部作業（炉内及び炉外計装の点検・交換、CRD駆動部点検、原子炉容器及び炉心支持構造ISI）
- ・ 格納容器局部漏洩率試験（格納容器ハッチ等を除く）

（燃料交換中の燃料取扱系の除熱性能を担保するため）

- ・ 非常用電源系（DG含む）点検
- ・ 非常用海水系点検
- ・ 補機冷却系点検

（工程上終えておくことが望ましいもの）

- ・ 1次冷却系点検（主循環ポンプ軸封部点検含む）
- ・ 2次冷却系点検（SG伝熱管検査含む）
- ・ 常用電源系点検

これらの項目の内、FBR固有なものは、炉上部作業と1次及び2次冷却系の点検であり、その他の項目は基本的に軽水炉と同等である。非常用電源系・海水ポンプ等の軽水炉と同等な作業項目では、いずれも軽水炉の最短実績で18日程度に収まっている。

また、タービン発電機については、軽水炉並にシフト作業を取り入れればクリティカルとはならない。

以上のことから、実証炉の設計をベースとした定検短縮の可能性についての目安は以下のとおりに集約される。

・ 降温	0.5 日
・ CRD作動試験	2 日
・ 1次主冷却ポンプ点検 or DG点検等	18 日
・ 燃料交換・後始末	12 日
・ 格納容器ハッチ閉・漏洩試験	2.5 日
・ CRD性能試験	3 日
・ 起動試験（炉特性試験）	2 日
・ 官庁立会検査日程調整	2 日
	合計 42 日

上記は、実証炉の定検実施に当たっての制限条件である

- ・ 1次主循環ポンプのデッキ上面への立入制限の排除
- ・ 燃料交換作業の開始条件の緩和（炉停止後30→20日）

の対策を行った場合で、かつ実証炉の設計と同等（燃料交換体数等）の場合に可能性のある工程である。従って、これをベースとして実用化プラントの定検短縮について検討するものとする。

### (c) 定検工程短縮のための条件

#### ① 設計に配慮すべき事項

前項までの定検に関する検討により摘出された、定検短縮の観点から設計に反映すべき事項は以下の通りである。

（工程上の制約条件の緩和方策）

- ・ 炉心崩壊熱が定検中も多重性を持って除去でき、かつその多重性を担保するためにDG等の点検着手が遅れることのない設計とすること（具体的には、DG、海水系、補機冷却水系等は、原則として炉停止24時間後以降点検着手可能とすること）
- ・ 1次系容器等のデッキ上面に立入が必要な場合、放射線の減衰待ちのために工程が遅れることのない設計とすること

- ・ 炉停止 20 日後以降、燃料交換作業が可能な燃料取扱系の設計とすること

(各作業工程の短縮方策)

- ・ 1 次・2 次共主冷却系は N a ドレンすることなく各機器、計装等の点検、交換、検査ができる設計とすること
- ・ 原子炉建屋は矩形とする等建屋クレーンの増設が可能な設計とすると共に、増設クレーンにより炉上部作業・1 次主循環ポンプ点検が並行実施可能な設計とすること（ポンプ点検等を専用の架台・クレーンで実施可能とする場合はこの限りではない）
- ・ 格納容器ハッチの仮置き場所、主要機器（CRD 駆動部、炉内外計装、主循環ポンプ・モータ、燃料交換機、機器輸送キャスク、プラグ取扱機、ISI 装置等）の仮置き、点検スペースを確保すること
- ・ 燃料及び制御棒交換体数ができるだけ少なくなるよう設計すること
- ・ 燃料交換機はできるだけ 1 基で可能な設計とすること（実証炉のように 2 基とすると 2 日程度定検期間延長になる）
- ・ 補助 N a 系は必要最小限に簡素化し、点検対象を削減すること
- ・ 小口径の N a 配管を排除してヒータ等点検時凍結防止のための N a ドレンを不要とする設計、もしくはヒータ点検の自動化等により点検時間を短縮して凍結防止を図った設計とすること
- ・ 予熱設備の内、主冷却系設備等初期の N a 充填時のみ予熱の必要な設備については、ガス予熱等仮設設備で対応できる方策をとることにより本設設備の簡素化を図った設計とすること

② R & D による開発、確認を要する事項

前項までの定検に関する検討により摘出された、定検短縮の観点から R & D による開発・確認を要する事項は以下の通りである。

- ・ 長寿命制御棒（3 運転サイクル化目標）の開発
- ・ 高温用 S G 伝熱管体積検査装置の開発
- ・ 原子炉容器外壁等目視検査装置の高度化・小型化
- ・ 原子炉容器異材継手等体積検査装置の高度化・小型化
- ・ ナトリウム中目視検査装置（炉内構造物等）の開発

(ii) 保守・補修コスト低減に関する検討

運転保守コストを低減するためには、稼働率を向上させること、即ち上記の定検短縮と共にトラブルによる長期停止を回避することが重要である。そこでトラブル時の早期復旧方策について以下の通り検討した。

トラブル時の早期復旧を図るためには

- ・ トラブルの早期検知と拡大防止
- ・ 原因究明の迅速化
- ・ 復旧作業時間の短縮

について方策をとる必要がある。

(a) トラブルの早期検知と拡大防止

トラブルの早期検知は、トラブルが大きくなる前に必要な措置を取って拡大防止を図ることにより復旧を容易にすることができる。FBRにおいては、プラント特性、振動などの異常診断に加え、Na 漏洩検知とSGにおける水漏洩検知が重要である。この内、Na 漏洩検知については既に十分な精度を有する検出設備が開発されているが、SGの水漏洩検知については感度のよい音響計、固体電解質水素(酸素)計の開発を進める必要がある。更に、軽水炉との大きな相異点は、ナトリウム中では水中並に目視検査ができていないというところにあり、軽水炉並の保守性を確保する観点からはナトリウム中の目視検査装置を開発することが必須である。

また、もんじゅを対象に開発を進めている異常監視・診断システム、構造健全性モニタリングシステムを確立し、実用化することが望まれる。

(b) 原因究明の迅速化

トラブルの早期復旧のためには、その原因を究明することが必須であり、これを迅速に行う必要がある。このためには、当該部位の運転中の熱過渡、応力等の履歴、腐食環境(酸素濃度)等を監視できることが有用である。このための方策としては

- ・ Na 純度を常時監視するための固体電解質水素(酸素)計の開発
- ・ クリティカル部位の熱履歴等から設計余裕を常時把握するシステムの開発

等が有効であり、また将来的には光ファイバーを用いた温度、流量、圧力、放射線等を同時にかつ分布計測するシステムが開発されれば画期的な監視システムとなる可能性がある。

(c) 復旧作業時間の短縮

復旧作業期間を短縮するためには、機器の特性から想定される故障の発生頻度と万一の故障発生時の補修の難易度に基づき、予め補修方法を設計で考慮しておく必要がある。基本的には、できる限り引き抜き及び搬出補修が可能な設計にすることが望ましいが、Na 系の容器、配管等のやむを得ない構造物については遠隔インプレース補修で設計するものとする。

このため、炉心近傍機器(炉心支持構造物、原子炉容器、炉内構造物、



ルーフデッキ等)、配管等の遠隔インプレース補修装置を開発する必要がある。

### (3) 実用化に向けた運転保守コスト低減方策の適用性検討

上記で抽出した運転保守コスト低減方策をナトリウム冷却実用化候補プラントの概念検討<sup>1)</sup>に適用し、定検工程短縮を主眼に検討した。また、ナトリウム冷却炉の運転保守コスト低減方策をベースとして、鉛-ビスマス冷却炉<sup>2)</sup>、ガス炉<sup>3)</sup>について検討を行った。

#### (i) ナトリウム冷却ループ型炉

##### (a) 所内比率の低減

大型ループ型炉における所内比率は、実証炉（フェーズ2）の約 5.9% に対して主に以下のような設計上の変更、工夫により軽水炉と同等の約 4.1%に抑えることができる見通しを得た。

- ・ 炉心低圧損化による1次主循環ポンプ動力の低減
- ・ 2次主循環ポンプの電磁ポンプから機械式への変更による負荷の低減
- ・ 建屋容積縮小による換気空調系負荷の低減
- ・ 炉外燃料貯蔵槽削除による負荷低減 等

##### (b) 定検工程短縮に関する検討

###### ① 定検工程に関係するプラントの特徴

定検工程に影響するナトリウム冷却ループ型炉の特徴は以下に示す通りである。

- 熱出力 3,570MWt、電気出力 1,500Mwe（2ループ）のツインプラント構成である。
- 1次系容器は、上部流入方式となっており、ポンプデッキ上面の線量率はデッキを配管が貫通するトップエントリー方式の実証炉より低く抑えられている。
- 原子炉建屋を矩形として建屋クレーンを2基に増設し、炉上部作業と1次主循環ポンプ点検を並行実施可能としてクレーンの取り合いによる工程遅延を排除している。
- 炉外燃料貯蔵槽を削除して水プール直接取り出し方式としている。
- DG、海水系、補機冷却水系等は、2系統構成としている。
- 崩壊熱除去系は、IRACS 2系統、DRACS 1系統としている。
- 炉心高さは 0.8m、燃料集合体は内側炉心 316 体、外側炉心 266 体、ブランケット 198 体、制御棒は 55 体である。

- 燃料交換バッチ数は4バッチ（燃料交換体数 195 体）で、運転サイクル長さは17カ月である。

## ② 定検工程策定の前提条件

定検工程策定に当たっては、以下の前提条件（各機器の設計条件等）を踏まえて検討した。

- 定検期間は、発電機解列～発電機並列までとする。（全炉型共通）
- 定検期間短縮のため、定検期間中は炉停止時のみ実施可能な原子炉構造、熱輸送系の点検を中心に行うものとし、格納施設外の燃料取扱設備、放射性廃棄物処理設備、共通補修設備等の点検は原子炉運転中に実施するものとする。（全炉型共通）
- 1次主循環ポンプデッキ上面への立入は炉停止4日後以降可能となるよう遮へい設計を行う。
- DG、海水系、補機冷却水系、崩壊熱除去系等は炉停止24時間後以降点検開始可能な設計とする。
- 燃料交換を炉停止21日後以降開始可能となるよう燃料取扱系を設計する。
- 標準定検のためのオペフロ等の仮置き、点検スペースは確保されているが、標準外定検の回転プラグ点検についてはスペースが確保できないため、1次主循環ポンプ点検とシリーズに実施する。
- 制御棒駆動機構、主循環ポンプ軸封部等必要なローテーションパーツを具備し、点検期間の短縮を図るものとする。（全炉型共通）
- 原子炉容器等 I S I 装置（外面から目視・体積検査）、炉内構造物用 I S I 装置（ナトリウム中目視検査）、高温用 S G 伝熱管体積検査装置が開発されているものとする。（全炉型共通）
- 1日の作業時間は、通常8時間、シフト作業時22時間とする。（全炉型共通）
- 官庁検査のための曜日調整、時間調整はないものとする。（全炉型共通）

## ③ 定検工程検討結果

上記のプラントの特徴、前提条件を踏まえてナトリウム冷却ループ型炉の定検工程について検討した。定検工程表を表-5に示す。

当炉のクリティカル工程は、降温→1次主循環ポンプ点検→燃料交換・後始末→格納容器ハッチ閉→DG自動起動試験→CRD性能試験→炉特性試験→昇温となり、標準定検としては約40日、標準外定検としては格納容器全体漏洩率試験のために3定検毎に+5日、回転プラグの分解点検のために4定検毎に+11日必要となる。したがって、平均定検

日数としては約 45 日となる。但し、回転プラグの分解点検期間については、点検に時間を要するフリーズシールがないなど簡素な構造とはしているが、もんじゅの設備点検実績からすると倍程度の時間は要すると考えられ、今後設計の詳細化に当たっては点検の容易化を検討する必要がある。また、点検周期がエラストマシールの耐久性から決まっているため、長寿命の同シールを開発することも有効な方策である。

以下に、主要な点検項目に対する検討内容を示す。

a. CRD試験関係工程

CRDの試験としては、定検初期に行う作動試験、駆動部点検、燃料交換後に行う性能試験がある。この内、作動試験についてはCRDに不具合のないことを確認するために実施するものであるが、運転中の荷重監視、定検時の炉停止操作時にスクラムさせる等により確認できるため、省略可能である。但し、工程上はクリティカルパスになっていないので作動試験を見込んだとしても全体工程には影響しない。

性能試験については、通常の定検を行うものとして工程を組んでいるが、制御棒本体が交換になることから使用前検査として官庁立会となる場合には1～2日程度工程が延びると考えられる。

一方、性能試験項目の内、常駆動試験は基本的に駆動装置側の試験であるため、制御棒交換前に前倒し（オフクリティカル）で実施し、制御棒交換後に位置ゼロ調、ラッチ・デラッチ試験およびスクラム試験（スクラムのための制御棒引き抜き時、常駆動試験結果との比較評価を行う）を実施することにより、工程を1～1.5日程度短縮可能と考えられる。

b. 炉上部作業と1次主循環ポンプ点検の並行作業化

天井クレーンの増設が可能であり、クレーンを1台増設することにより、炉上部作業と1次主循環ポンプ点検作業のクレーンの取り合いによる手待ちを回避することとした。

クレーンの増設を行わない場合には、CRD駆動部点検作業、燃交準備作業および制御棒交換作業が1次主循環ポンプの点検と並行実施できなくなるため、7日程度全体工程が延びることになる。

c. 1次主循環ポンプ点検

1次主循環ポンプの点検については、天井クレーンの増設により炉上部作業との干渉を回避し、遮へいの適正化によりデッキ上面への立入制限を緩和したことにより、工程を前倒しして全体工程の短縮化を図った。

点検項目として軸封部点検（メカニカルシールの予備品と交換）、モータ軸受け点検を毎定検実施することとし、総点検期間を22日、

内クリティカルを 20 日と設定した。

点検期間としては、もんじゅの設備点検実績、軽水炉 1 次主冷却材ポンプの同種作業実績からすると長いが、ポンプが大型化していること、現状では詳細構造が具体化されていないこと、軽水炉と異なりアルゴンガス軸シールを行いながらの作業となること等から、妥当なものとして判断される。

d. 制御棒および燃料交換作業

交換対象燃料等集合体数は、制御棒 55 体 (全数)、燃料 195 体 (1/4 バッチ) である。また、炉外燃料貯蔵槽を削除して使用済燃料の水プールへの直接取り出し方式としたため、従来燃料交換機側がクリティカルとなっていたが、本炉では燃料出入機の移動がクリティカルとなっており、この取扱い時間については検討の結果、1 体当たり 53 分とできることが分かった。但し、燃料出入機の走行速度、燃料の昇降速度は、もんじゅのそれより高速化 (但し、低速で取り扱う必要のある部分の速度は変更なし) できることを前提としている。

e. 炉物理試験工程

本試験は、もんじゅでの今後の試験実績を踏まえた合理化、試験データの即時自動処理化により、軽水炉での実績並に合理化されるものとして 2 日と設定した。

(c) 中型モジュール・ループ型炉に関する検討

① ループ型中型モジュール炉の特徴

ループ型中型モジュール炉の運転保守の観点からの特徴は以下の通りである。

- 熱出力 1,190MWt の原子炉モジュール 3 基で、1,500MWe タービン 1 基のツインプラント構成。
- 各原子炉モジュールは、1 次ナトリウム系は 2 ループ、2 次ナトリウム系 1 ループで構成されている。したがって、1 次主循環ポンプは 2 基/モジュール、SG は 1 基/モジュール設置されている。
- 燃料取扱系は、6 モジュールで共用する。
- SG は物量低減の観点から、大型炉のヘリカルコイル型を直管型に変更している。このため、伝熱管本数が 3,535 本と多くなっている。
- 非常用 DG は 2 基/モジュール、崩壊熱除去系は IRACS 1 系統、PRACS 2 系統/モジュールが設置されている。
- 燃料集合体数は、炉心燃料 222 体、ブランケット 60 体、制御棒

は 19 体である。

- 燃料交換バッチ数は、4 バッチ（燃料・制御棒交換体数 90 体）、  
運転サイクル長さ 17 カ月である。
- 所内比率は、大型炉に比べて単位出力当たりの建屋容積が大きくなることから、大型炉の 4.1% から 4.5% に増加する。

## ② モジュール炉の経済性向上方策の検討

### a. 定検工程の検討結果

上記モジュール炉の特徴を踏まえて、定検工程について検討した。定検工程表を表-6 に示す。

モジュール炉の場合、大型炉に比べて交換する燃料体数、制御棒体数が少ない等から大型炉でクリティカルとなっている工程については 10 日程度短縮できる可能性があったが、直管 SG 採用により体積検査対象伝熱管本数が多くなるため、これがクリティカルとなって 1 モジュールの定検期間は大型炉より約 6 日短い 34 日となった。

標準外定検としては、格納容器全体漏洩率試験のため +5 日 / 3 定検、回転プラグ定検のため +5 日 / 10 定検が必要となり、平均定検日数としては 37 日となる。

### b. 稼働率向上方策の検討

本モジュール炉において、1 号炉の定検時にタービンを合わせて定検し、1 号炉の運転中に 2 号炉、3 号炉を順次定検するとした場合、その稼働率は 89.1% となり、大型炉の稼働率 92.7% に比べてかなり低くなる。

これは 1 号炉の定検時にタービンの定検をするため、2・3 号炉が停止する必要があるのに停止するためである。そこでモジュール炉の稼働率を向上するため

- 3 モジュールをできるだけラップさせて定検し、タービン定検による他モジュールの不要な停止期間を短縮する
- タービンの定検インターバルを炉側のそれより長くしてタービン停止による不要な停止の影響を軽減する

という、2 つの方策について検討した。

前者については、完全にラップさせることができれば、モジュール炉の定検期間は 34 日で大型炉の定検期間 40 日より短いため大型炉の稼働率を上回ることができる。しかし、モジュール炉の燃料取扱系は共用設備であるため、燃料交換作業はシリーズに実施せざる

を得ない。これを考慮した最短工程は、1・2・3号炉を7日遅れでラップさせた場合となる。この場合の稼働率は92.6%で大型炉のそれとほぼ同じである。但し、この場合、SG伝熱管検査装置は3倍、その他の治工具、検査装置については2倍程度必要となり、短期間に作業が集中するので保守作業員の確保が課題となる。また、1つのユニット遅れが他ユニットに影響するため、ユニット間の作業の工程調整も課題となる。

後者については、基本的に原子炉とタービンの定検インターバルを同じにする必要がないことに着眼したものである。大型炉の場合原子炉の停止はタービンの停止と連動するが、モジュール炉の場合は、いずれかのモジュールの原子炉の定検と合わせてタービンの定検を実施すればよいことになる。したがってタービンの定検インターバルを長くすれば、その分稼働率の向上が図れることになる。

電気事業法で火力の蒸気タービンについては原則として4年以内に定検することを義務づけられていることおよびFBRの蒸気条件は過熱蒸気であり火力のタービンに近いことから、将来規制緩和により当炉のタービンの定検インターバルは4年以内とできるものとする。この場合の稼働率は92.1%（定検パターンを表-13に示す）となり、大型炉に比べて劣るがその差は0.5%である。また、モジュール炉の場合、5～6カ月間隔で順次原子炉の定検を実施することになるので、タービンの信頼性を実証しながら徐々に定検インターバルを長くしていくことができることも長所である。

以上の検討結果を踏まえると、後者は稼働率で前者に少し劣るがそれでも92%程度と高く、定検ラップによる実施上の困難さがないことから後者をレファレンスと考えることとする。

#### c. モジュール炉の保守コストの推定

モジュール炉の保守コストについて大型炉との差異について検討を行った。検討にあたっては、大型炉の原子炉側の定検・修繕工事費をタービン側のそれと同等と想定した。この場合、タービン側の工事費についてはモジュール炉と大型炉で差異はない。原子炉側については作業項目について両者に殆ど差がないので、工数が両者の定検日数に比例するもの（40日対34日×3モジュール）とする。この場合、大型炉の原子炉側工事費に対してモジュール炉のそれは約2.5倍要することになる。タービン側も含めた全体としては、モジュール炉の工事費は大型炉のその約1.75倍（50%×2.5+50%

=175%) 要すると推定される。

(d) 運転保守上の課題と開発計画

FBRの運転保守技術を確立するという観点からは、まず実機であるもんじゅを活用して安定運転により信頼性を実証することが第一であり、これについては第(3)(vi)項に記載のとおりである。

運転保守コスト低減の観点からR&Dにより開発すべき技術としては以下のものが挙げられる。

① 高温用SG伝熱管体積検査技術の開発

軽水炉と同等(40日程度)の定検工程を達成するためには、工程を長期化させる検査のためのナトリウムドレンおよび降・昇温作業を不要とできる、高温(200℃程度)でのSG伝熱管の体積検査技術を開発することが必須であり(この技術が開発できない場合、15日程度定検工程が延びることになる)、早期にその見通しを得ておく必要がある。この観点から少なくともフェーズ2でセンサ部分の成立見通しを得ておくことが望ましい。

② ナトリウム中目視検査技術の開発

軽水炉並の運転保守性を確保しFBR実用化に繋げていくためには、ナトリウムをドレンせずに炉内等の状況を検査・確認できる技術を開発していくことが重要であり、この技術の開発見通しを早期に得ておく必要がある。この観点から、少なくともフェーズ2において目視検査用UTセンサの成立見通し(高解像度化、画像化処理時間の短縮)を得ておくことが望ましい。

③ 長寿命制御棒の開発

制御棒交換体数を削減して定検工程短縮を図ると共に、廃棄物量の低減を図るためには、長寿命制御棒を開発することが有効であり、かつその実証には長期間を要するため、早期に開発を進めることが望まれる。

④ 原子炉容器外面等目視・体積検査装置の高度化・小型化

原子炉容器外面等目視・検査装置については、既にもんじゅ用に開発されたものがあるが、実用化に向けてはその小型化を図る必要がある。但し、その開発時期としては、もんじゅでの同装置の改良・高度化やロボット技術の進展を踏まえてフェーズ3以降とする方が効率的と考えられる。

⑤ トラブルの予防保全技術の高度化

トラブルの早期検知による拡大防止の観点から、これまでもんじゅを対象に開発が進められている異常監視・診断技術や構造健全性モニタリング技術については、これら技術の確立に時間が要することから継続実施し着実に技術の高度化を図っていく必要がある。

(ii) ナトリウム冷却タンク型炉

(a) 定検工程に関する検討

① 定検工程に係るプラントの特徴

定検工程に影響するナトリウム冷却タンク型炉の特徴は以下に示す通りである。

- 熱出力 3,660MWt、電気出力 1,500MWe（2ループ、但し1次主循環ポンプは3基）のツインプラント構成
- タンク型炉のため、ポンプデッキは炉ルーフデッキとなるので線量率は低く、放射線減衰待ちによる立入制限はない。
- 天井クレーンは1基としている。
- 炉外燃料貯蔵槽を簡素化して2～4体の燃料交換槽とし、炉容器～燃料交換槽間の移動を行う燃料出入機と燃料交換槽～水プール間の移動を行う燃料出入機を設置する方式としている。
- 海水系、補機冷却水系等は2系統構成、DGは3基としている。
- 崩壊熱除去系は、PRACS4系統としている。
- 燃料集合体は、炉心燃料522体、ブランケット186体、制御棒は45体、溶融燃料排出チャンネル16体である。
- 燃料交換バッチ数は4バッチ（燃料等交換体数227体）で、運転サイクル長さは21カ月である。

② 定検工程策定の前提条件

定検工程策定に当たっては、以下の前提条件（各機器の設計条件等）を踏まえて検討した。

- 1次主循環ポンプデッキ上面への立入制限がないため、系統の降温、格納容器ハッチ開に引き続いて、1次主循環ポンプの点検に着手する。
- DG、海水系、補機冷却水系等は炉停止24時間後以降開始可能な設計とする。
- 燃料交換を炉停止26日後以降開始可能となるよう燃料取扱系を設計する。
- 1日の作業時間は、通常8時間、シフト作業時22時間とする。
- 官庁検査のための曜日調整、時間調整はないものとする。

③ 定検工程検討結果

上記のプラントの特徴、前提条件を踏まえてナトリウム冷却タンク型炉の定検工程について検討した。定検工程表を表-7に示す。

当炉のクリティカル工程は、降温→1次主循環ポンプ点検→燃料交



換・後始末→格納容器ハッチ閉→格納容器ハッチ漏洩率試験→CRD性能試験→炉特性試験→昇温となり、標準定検としては約45日、標準外定検としては格納容器全体漏洩率試験のために3定検毎に+5日、回転プラグの分解点検のために4定検毎に+10日必要となる。したがって、平均定検日数としては約49日となる。

以下に、主要な点検項目に対する検討内容を示す。

a. CRD試験関係工程

CRDの試験としては、定検初期に行う作動試験、駆動部点検、燃料交換後に行う性能試験がある。この内、作動試験についてはCRDに不具合のないことを確認するために実施するものであるが、運転中の荷重監視、定検時の炉停止操作時にスクラムさせる等により確認できるため、省略可能である。但し、工程上はクリティカルパスになっていないので作動試験を見込んでいる。

性能試験については、通常定検を行うものとして工程を組んでいるが、制御棒本体が交換になることから使用前検査として官庁立会となる場合には1～2日程度工程が延びると考えられる。

一方、性能試験項目の内、常駆動試験は基本的にCRDの機能を確認する試験であるため、制御棒交換前に前倒し実施し、制御棒交換後に位置ゼロ調、ラッチ・デラッチ試験およびスクラム試験（官庁検査）を実施することにより、工程を1日程度短縮可能と考えられる。

b. 炉上部作業と1次主循環ポンプ点検の干渉

天井クレーンの増設は可能であるが、増設しても1次主循環ポンプ点検作業も炉上部作業となるため、他の炉上部作業との並行作業化が難しく、メリットが出ないので増設しないこととした。

CRD駆動部点検作業、原子炉容器等ISI作業、および計装品点検、交換作業が1次主循環ポンプの点検と並行作業となり、クレーンの取り合いで干渉するが1基のクレーンで実施可能とした。今後、設計を詳細化していくとクレーンの増設が必要になる恐れはある。燃料交換準備作業以降の作業については、炉上部の配置上クレーンを必要とするポンプ点検作業と並行実施不可能なため、ループ型炉に比べて工程が長くならざるを得ないことになる。

c. 1次主循環ポンプ点検

1次主循環ポンプの点検項目、点検期間は、ループ型炉と同等である。

d. 制御棒および燃料交換作業

交換対象燃料等集合体数は、制御棒45体（全数）、燃料178体（1/4バッチ）、熔融燃料排出チャンネル4体（1/4バッチ）の計227体で

ある。また、炉外燃料貯蔵槽を2～4体収容できる燃料交換槽とし、燃料交換中に燃料交換槽から使用済燃料を取り出して乾式洗浄後水プールに浸漬することとしている。この場合にクリティカルとなる燃料出入機の取扱い時間を1体当たり47分として計8日と設定した。但し、燃料出入機の走行速度、燃料の昇降速度は、もんじゅのそれより高速化できることを前提としている。

また、本工程では、制御棒を毎定検全数交換することとしているが、今後開発を計画しているナトリウムボンド軸非均質制御棒を採用すれば少なくとも半減可能（1日弱工程短縮可能）と考えられる。

#### e. 炉物理試験工程

本試験は、もんじゅでの今後の試験実績を踏まえた合理化、試験データの即時自動処理化により、軽水炉での実績並に合理化されるものとして2日と設定した。

### (b) 中型モジュール・タンク型炉に関する検討

#### ① タンク型中型モジュール炉の特徴

タンク型中型モジュール炉の運転保守の観点からの特徴は以下の通りである。

- 熱出力 1,220MWt の原子炉モジュール3基で、1,500MWe タービン1基のツインプラント構成。
- 1次主冷却系の構成は基本的に大型炉と同じく、1次主循環ポンプ3基/モジュール、中間熱交換器2基/モジュールであるが、2次主冷却系はSG1基/モジュールである。
- 燃料取扱系は、6モジュールで共用する。
- 非常用DGは2基/モジュール、崩壊熱除去系は原子炉容器のガードベッセルおよびSGエンクロージャを空気で冷却する方式、即ちRVACSおよびSGACSを採用している。
- 燃料集合体数は、炉心燃料150体、ブランケット102体、制御棒は17体、溶融燃料排出チャンネル2体である。
- 燃料交換バッチ数は4バッチ（燃料等交換体数82体）、運転サイクル長さ18カ月である。

#### ② 定検工程の検討結果

上記モジュール炉の特徴を踏まえて、定検工程について検討した。定検工程表を表-8に示す。

モジュール炉の場合、大型炉に比べて交換する燃料体数、制御棒体数が少ない等から大型炉より約7日短い38日となった。

標準外定検としては、格納容器全体漏洩率試験のため+5日/3定検、

回転プラグ定検のため+5日/12定検が必要となり、平均定検日数としては41日となる。

③ モジュール炉の経済性向上方策の検討

ループ型炉と同様に

- 3モジュールをできるだけラップさせて定検し、タービン定検による他モジュールの不要な停止期間を短縮する
- タービンの定検インターバルを炉側のそれより長くしてタービン停止による不要な停止の影響を軽減する

という、2つの稼働率向上方策について検討した。

前者については、1・2・3号炉を8日遅れでラップさせた場合が稼働率最大の92.5%、後者については稼働率91.7%（定検パターンを表-13に示す）というループ型炉と同様の結果となった。

(c) 運転保守上の課題と開発計画

ナトリウム冷却ループ型炉に同じ。

(iii) 鉛-비스마스冷却炉

(a) 所内比率の推定

鉛-비스마스炉の所内比率は、実証炉の所内負荷データを基に出力・建屋容積等の比率や、主冷却系および崩壊熱除去系への完全自然循環冷却の採用によるポンプ負荷の削減、2次主冷却系の削除による負荷の削除等を考慮して推定した結果、表-9に示す通り約2.8%となった。

実証炉の所内比率5.9%に比べて半減した理由は、実証炉で所内負荷の約50%を占めていた1次および2次主循環ポンプを削除したことが大きい。尚、今後詳細に設計を進めていくことにより、ポロニウムの移行による被ばくを軽減する必要性から、建屋換気率を上げる必要が生じた場合には、換気空調系の負荷が増えて所内比率が増加する可能性がある。

(b) 定検工程に関する検討

① 定検工程に係るプラントの特徴

定検工程に影響する鉛-비스마스冷却モジュール炉の特徴は以下に示す通りである。

- 熱出力1,053MWt/モジュール、電気出力1,600MWe/4モジュール、即ち、原子炉4モジュールに対して1基のタービン設置のツインプラント構成である。
- 燃料取扱系は、8モジュールの共用設備である。

- 1次主冷却材が鉛-ビスマスのため、2次系は設けず直接水・蒸気系で冷却する。
- 主冷却系に全自然循環を採用しており、ナトリウム炉でクリティカルとなっていた1次主循環ポンプ点検はない。
- SGは原子炉容器内設置で、伝熱管の体積検査に係る作業は炉上部作業と干渉する。
- 非常用DGは2基設置し、主に補機および空調に接続する。崩壊熱除去系は自然循環であり、DGには接続されない。
- 天井クレーンは1基としている。
- 燃料取り出し方式は、ナトリウム冷却ループ型炉と同じく水プール直接取り出し方式である。
- 海水系、補機冷却水系等は2系統構成、DGは2基としている。
- 燃料集合体は、炉心燃料426体、ブランケット132体、制御棒は36体である。
- 燃料交換バッチ数は10バッチ（燃料交換体数57体）で、運転サイクル長さは19カ月である。尚、制御棒については、中性子束レベルがナトリウム冷却炉の1/2程度であることから2バッチ（制御棒交換体数18体）とした。

② 定検工程策定の前提条件

定検工程策定に当たっては、以下の前提条件（各機器の設計条件等）を踏まえて検討した。

- 点検の開始は、原子炉容器ホットプレナム温度が炉停止24時間後水系除熱により約300℃まで降温され、PRACS除熱に切り換えられた後とする。尚、その後ISI実施のため250℃程度以下に維持する。
- ISI機器については、ナトリウム炉で開発を予定しているものと同等の検査速度・検査精度を有するものが開発されているものとする。
- SG伝熱管は、体積検査を毎定検全数実施するものとし、管板が3つあるため検査装置3基で並行作業とする。
- 燃料交換は、燃料出入機を共用としているため、同時に複数のモジュールで実施することはできない。交換作業の開始は炉停止10日後以降（集合体崩壊熱10KW以下）可能な燃料取扱系の設計とする。尚、炉内中継槽に燃料ポットが配置上1個しか設置できない（ナトリウム炉では、2個設置してそれを回転させて使用する構造となっている）ため、燃料1体あたりの取扱い時間は、ナトリウム炉より60分と想定する。

- DG、海水系、補機冷却水系等は炉停止 24 時間後以降点検開始可能な設計とする。

### ③ 定検工程検討結果

上記のプラントの特徴、前提条件を踏まえて鉛-ビスマス冷却モジュール炉の定検工程について検討した。定検工程を表-10 に示す。

当炉のクリティカル工程は、降温→CRD駆動部点検→SG 伝熱管 ISI 準備作業→原子炉容器 ISI→原子炉構造等 ISI→SG 伝熱管 ISI 後始末→燃料・制御棒交換→格納容器ハッチ閉→格納容器ハッチ漏洩率試験→CRD性能試験→炉特性試験→昇温となり、標準定検としては約 39 日、標準外定検としては格納容器全体漏洩率試験のために 3 定検毎に+5 日、回転プラグの分解点検のために 10 定検毎に+10 日必要となる。したがって、平均定検日数としては約 42 日となる。

以下に、主要な点検項目に対する検討内容を示す。

#### a. CRD 試験関係工程

CRDの試験としては、定検初期に行う作動試験、駆動部点検、燃料交換後に行う性能試験がある。この内、作動試験についてはCRDに不具合のないことを確認するために実施するものであるが、運転中の荷重監視、定検時の炉停止操作時にスクラムさせる等により確認することとし、省略することとした。

性能試験については、燃料溶融防止の観点からCRDの駆動速度を遅くしているため、ナトリウム冷却炉と同じ手順で試験を行うと倍程度の9日間要することになる。

このため、性能試験項目の内、常駆動試験は基本的にCRDの機能を確認する試験であるため、制御棒交換前に前倒し実施し、制御棒交換後に位置ゼロ調、ラッチ・デラッチ試験およびスクラム試験（官庁検査）を実施することにより、クリティカル工程を4日程度に短縮させることとした。

但し、制御棒本体が交換になることから使用前検査として官庁立会となる場合には1日程度工程が延びると考えられる。

#### b. 炉上部作業と SG 伝熱管検査の干渉

天井クレーンの増設は可能であるが、増設しても SG 伝熱管検査も炉上部作業となるため、他の炉上部作業との並行作業化が難しく、メリットが出そうにないので増設しないこととした。

CRD 駆動部点検作業、原子炉容器等 ISI 作業、および計装品点検、交換作業が SG 伝熱管検査とクレーンの取り合いで干渉するが、1 基のクレーンで実施できるものと想定した。

#### c. 制御棒および燃料交換作業

交換対象燃料等集合体数は、制御棒 18 体 (1/2 バッチ)、燃料 57 体 (1/10 バッチ) の計 75 体である。1 体あたりの燃料交換に要する時間は、ナトリウム炉で要求される使用済燃料の嚴重な洗浄が緩和されることから燃料洗浄時間の短縮は可能であるが、前提条件で述べたとおり炉内の燃料ポットが 1 個のみの設置となっており案内管の上昇・下降操作も必要となることから、60 分とナトリウム炉より長く設定した。

本炉はモジュール型であり、8 炉心に対して 1 つの燃料プールが設置されている。このため、燃料プールに最も近い炉心と最も遠い炉心では、燃料の移送距離が 75m 程度異なる。これを考慮すると制御棒・燃料交換工程は、燃料プールにもっとも近い炉心の場合で 3.5 日、最も遠い場合で 4.5 日程度となる。

d. 炉物理試験工程

本試験は、もんじゅでの今後の試験実績を踏まえた合理化、試験データの即時自動処理化により、軽水炉での実績並に合理化されるものとして 2 日と設定した。

e. タービン点検工程

タービンの分解点検に必要な期間は、軽水炉での最短実績が 37 日である。本炉のタービンは 1,600MWe と出力が大きい、軽水炉より蒸気温度が高いため出力に比較してタービンは小さくなるので基本的に軽水炉並の期間で点検可能と想定し、クリティカルにはならないものとした。

④ 稼働率向上方策

本モジュール炉において、1 号炉の定検時にタービンを合わせて定検し、1 号炉の運転中に 2 号炉、3 号炉、4 号炉と順次定検するとした場合、その稼働率は 88.8% となり、大型炉に比べてかなり低くなる。

そこで本モジュール炉の稼働率を向上するため、ナトリウム冷却中型モジュール炉と同じく

- 4 モジュールをできるだけラップさせて定検し、タービン定検による他モジュールの不要な停止期間を短縮する
- タービンの定検インターバルを炉側のそれより長くしてタービン停止による不要な停止の影響を軽減する

という、2 つの方策について検討した。

前者については、モジュール炉の燃料取扱系は共用設備であるため、燃料交換作業はシリーズに実施せざるを得ないことを考慮した最短工程

は、1・2・3・4号炉を8日遅れでラップさせた場合となる。この場合の稼働率は92.4%で大型炉のそれに匹敵する。但し、この場合、SG伝熱管等検査装置、その他の治工具については2倍程度必要となり、短期間に作業が集中するので保守作業員の確保が課題となる。また、1つのユニット遅れが他ユニットに影響するため、ユニット間の作業の工程調整も課題となる。

後者については、基本的に原子炉とタービンの定検インターバルを同じにする必要がないことに着眼したものである。大型炉の場合原子炉の停止はタービンの停止と連動するが、モジュール炉の場合は、いずれかのモジュールの原子炉の定検と合わせてタービンの定検を実施すればよいことになる。したがってタービンの定検インターバルを長くすれば、その分稼働率の向上が図れることになる。

電気事業法で火力の蒸気タービンについては原則として4年以内に定検することを義務づけられていることおよびFBRの蒸気条件は過熱蒸気であり火力のタービンに近いことから、将来規制緩和により当炉のタービンの定検インターバルは4年以内とできるものとする。この場合の稼働率は91.9%（定検パターンを表-13に示す）となる。また、モジュール炉の場合、4～5カ月間隔で順次原子炉モジュールの定検を順次実施することになるので、タービンの信頼性を実証しながら徐々に定検インターバルを長くしていくことができることも長所である。

以上の検討結果を踏まえると、後者は稼働率で前者に少し劣るがそれでも92%程度と高く、定検ラップによる実施上の困難さがないことから後者をレファレンスと考えることとする。

#### (c) 運転保守上の課題検討

鉛-ビスマス冷却炉については、所内比率、定検工程の検討に加えて、実用化に向けた保守、補修コスト低減の観点から技術課題を抽出すると共に、考えられる課題解決方策について検討した。

##### ① 保守性に関する検討

###### a. 点検着手条件の整理及び定期点検に及ぼす影響評価

定検着手上、当該炉特有の制約がないか検討し、着手条件、定検工程への影響を評価した。その結果、ポロニウムの発生、移行に伴う格納容器内の浄化については、カバーガス中にベーパーラップを設け、通常運転中カバーガスを循環させてその濃度を低く抑えることにより、定検開始前に時間をかけて格納容器内の浄化を行う必要がなく、定検工程への影響はない見通しである。また、1次冷却材温度が300℃に

まで下がった時を定検開始とすれば、炉停止後 24 時間以内で定検開始が可能であり、定検工程への影響はない見通しである。

#### b. CRDの駆動部点検と性能試験

当該炉に適合する制御棒駆動方式の概念を抽出し、保守・補修、性能試験について検討し、定検工程への影響を評価した。制御棒のスクラム方式としては、落下型、浮上り型共に考えられ両者の点検性に優位な差はないが、落下型とする場合には特性のよく分かっていないタンタルを制御材とする必要があることから、浮上り型を第1候補とすることとした。この場合の駆動部は、ナトリウム炉のそれと基本的に同様の構成となり、ペローズによりバウンダリが維持され、キャスクを用いることなく容易に取外し、分解点検、シールの交換が行えることから、定検工程はナトリウム炉の場合と同じである。

浮上り挿入型を採用した場合、駆動軸が制御棒を確実にラッチしていることを確認できるか懸念され、検討した結果、図-1に示す概念とすれば問題ないことが分かった。同図において、駆動軸を右側に示す燃交後の位置から駆動モータを回して真ん中に示す位置まで下げ、グリップを開として制御棒をラッチする。この状態で駆動軸のリンク機構を開とすると、制御棒をラッチしていれば駆動軸は真ん中の位置のままであるが、ラッチできていなければ右側の位置まで浮いてしまうことになるので、駆動軸の位置検出器で確認できる。但し、駆動軸は液中部分だけでなく、気中部分もあるので、駆動軸単体で浮力が重量を上回るよう設計する必要がある、見通しはあるが今後の設計詳細化にあたって留意しておく必要がある。また、制御棒位置の0点調整は、制御棒をラッチできた位置がストローク基準の0点となり、その確認は、更に駆動軸を押し下げようとするとロードセルに浮力の増加による圧縮力が作用することで行える。

以上のことから、駆動部の分解・点検後の性能試験についてもナトリウム炉と同様に行える見通しであるが、駆動速度が低速になることによって定検工程に影響が生じるものの、常駆動試験を燃料交換前に行うなどの工程短縮化方策を取込むことによって、定検工程への影響は小さくできる。

#### c. 主循環ポンプ点検

当該炉では完全自然循環方式の冷却系を採用しているが、強制循環を想定した場合の主循環ポンプの点検について検討した。鉛-ビスマス冷却材をしようすることによる特徴として、構造材の浮き上がりと腐食に対する対応が必要となるのでこれを中心に検討した。

浮き上がりについては、構造材の重量と浮力がほぼ同等であるため、炉上部プラグへの取付部には設計の工夫により容易に下向きに力が作



用するようにできることから特に問題にならないと考えられる。但し、ポンプの据え付け挿入時には、自重と浮力の作用点のズレがあるため、ガイドを用意する等の工夫が必要となる。また、軸封部については、浮力が作用しないのでナトリウム冷却炉と同等に交換・点検が可能である。

腐食については、現状では定量的な腐食量の評価ができないが、定期的なインペラの取外し点検を予定せざるを得ないと判断される。この場合の引抜き・据付手順は基本的にナトリウム炉と同じであるが、機械加工面の点検等のためのポロニウムを含む鉛-ビスマスの洗浄法の開発が必要である。この点検作業には、相当期間要すると考えられ、定検工程へのインパクトが大きいのでポンプを用いない設計とすることが望ましい。

#### d. 燃料交換

燃料集合体の浮上り防止構造の概念を抽出し、燃料交換手順を検討し定検工程への影響を評価した。

燃料集合体の浮上り防止構造として、回して止めるバイヨネット機構方式、ロシアの設計例のようなファスナー機構方式、ラッチスプリング機構方式、ホールドダウンドプレートで押さえる方式、タングステン等の錘をつける方式、ハイドロリックホールドダウン方式についてその適用性を検討した。静止状態で浮力による上向き力が働く、流体力が小さく総浮き上がり力はナトリウム冷却炉の 1/3 程度である（逆にいうとハイドロリックホールドダウンは期待できない）、炉心上部機構があり回転させる必要がある、地震力に対して固定できる必要がある、といった炉の特徴を踏まえて適用性を検討した結果、強制的に止めていないという欠点があるが、総浮き上がり力が小さい本炉には有望で、かつ構造が簡単で固着が考えられないラッチスプリングを用いたメカニカルホールドダウン方式を第1候補とすることとした。地震による上向き力も考慮してラッチスプリングの構造を図-2のとおり設定した。スプリングの本数は6枚とし、一対でもスプリングが健全であれば燃料が保持されるよう多重性を持たせた。更なる信頼性向上が要求される場合には、ラッチスプリングの2段構造化、錘をつける方式との併用が有効と考えられる。

燃料移送ポットは、タングステンの錘を付けて浮上りを防止することとし、図-3に示すようにポット内で自然循環冷却パスが確保できる構造とした。尚、燃料集合体はラッチスプリングによりポットに固定する。

燃料交換作業は、炉内中継装置のラックが配置上単基とならざるを得ないため炉心⇔燃料交換機⇔炉内中継装置⇔燃料出入機の工程がク

リティカルとなる。燃料集合体は、燃料貯蔵プールでの保管に先立ってガスブロー及び蒸気ブローにより気密性を保った洗浄槽で洗浄するが、その時間は炉内クリティカル工程に収まるものと推定した。貯蔵プールのガス空間にポロニウムが持ちこまれるが、水プール上にエアカーテンと排気フィルターを設置することにより捕獲できる見通しである。

以上のように、ポロニウムによる作業員の被ばく対策については、何らかの設計対応はとれると判断されるが、換気系の設計等を具体化し合理的なものとするためにはポロニウムの特性把握試験が不可欠である。

e. 炉内構造物の目視検査

Na 中目視検査装置の適用性について、Na と鉛-ビスマスの特性から検討した。その結果、Na と鉛-ビスマス中での音速が同程度であることからナトリウム中目視検査装置と同程度の周波数で同程度の解像度が得られると推定される。但し、鉛-ビスマスのぬれ性及び超音波伝播（減衰）特性については、試験により確認しておく必要がある。

② 補修性等に関する検討

a. 冷却材漏えい検出、漏えい箇所同定

冷却材漏えい検出の考え方、検出方法、復旧方法について検討した。その結果、冷却材漏えいが想定される原子炉容器、膨張ポット及びP R A C S 系統は、ナトリウム炉のような漏えいに伴う火災や腐食性反応生成物による構造物破損が無いと推定されることから、L B B の観点から小規模の漏えいを早期に検出できればよいと推定した。この場合の漏えい検出器は、ナトリウム炉用に開発されているレーザ型漏えい検出器と接触式漏えい検出器、液面計及び温度計が適用できる。なお、従来ナトリウム炉において使用されてきたS I D、R I D、D P D は、鉛-ビスマス冷却材は漏えい時にエアロゾルが発生しないことから適用できない。

b. S G リーク検出、復旧方法

水漏えい対策及び検出手段、補修方策について検討した。その結果、水漏えいが発生しても水酸化物を含む反応生成物は生成せず、水素、酸素等のガスも発生しない。したがって、固体電解質水素計及び酸素計による検知は有効でなく、漏えいした水蒸気がカバーガス空間に移動するとして、その湿分、圧力により検出するものとする。大漏えいの場合は、ラプチャディスクの破裂によりカバーガス空間に流出した水蒸気を水蒸気放出プールに逃す対策をとる。中・小漏えいの場合は、

圧力及び湿分の上昇により、漏えいを運転員が判断することとした。

伝熱管破損位置の同定及び補修については、ナトリウム炉のような反応生成物による隣接伝熱管のウェステージは生じないので当該伝熱管のみを対象とでき、破損伝熱管の同定は鉛-ビスマスのインリークやガス加圧による検知が、補修は施栓による対応となり、従来ナトリウム炉向けに検討されてきた施栓方法が適用できると考えられる。

#### c. ドレン方法

原子炉容器内 1 次冷却材または崩壊熱除去系 2 次冷却材をドレンして補修する必要がある場合のドレン方法について検討した。その結果、熱交換器を除く崩壊熱除去系 2 次冷却材は、自然落下によりドレンできる。熱交換器内の冷却材は膨張タンクのカバーガス圧を加圧することによってドレンできる見通しである。一方、SG 伝熱管の下端程度まで原子炉容器内 1 次冷却材をドレンする場合、汲み上げポンプの開発（重金属用のポンプとしては既存のものがあるが、高性能・高揚程化が必要）やドレンした鉛-ビスマスの保管場所確保が課題となる。

#### (d) 運転保守上の課題と開発計画

上記運転保守性の検討から摘出された課題について、その重要度を踏まえてフェーズ 2 までに見通しを得る必要のある課題について検討した。鉛-ビスマス炉においては、高温用 SG 伝熱管体積検査技術、鉛-ビスマス中目視検査技術の開発がナトリウム冷却炉同様に必要になるが、基本的にはナトリウム冷却炉で開発される技術が適用可能と考えられる。但し、鉛-ビスマスのぬれ性、超音波の減衰特性、導電率等の特性を把握するための試験は、成立性を見通す上で別途必要になる。

鉛-ビスマス炉特有の課題としては、ビスマスの中性子照射によってポロニウムによる作業員の被ばく低減が重要である。これまでの調査では、ポロニウムの蒸発速度、蒸気圧等の海外文献はあるが十分でなく、除去技術に関する情報はない。したがって、燃料交換機、燃料集合体等の鉛-ビスマスの洗浄方法、洗浄時のポロニウムの挙動、除去技術を開発していく必要がある。ポロニウムが $\alpha$ 線源で作業員の吸入を防止すればよいこと、温度を下げれば回収できることから何らかの設計対応が可能であるため、成立性を左右するものではないと考えられるので緊急性は低い。フェーズ 3 で概念設計を開始するまでには実施しておくことが望ましい。尚、ポロニウムは天然のウラン鉱中に存在し、入手可能である。

(iv) ヘリウムガス冷却炉

(a) 所内比率の推定

実証炉フェーズ2設計の所内負荷から設備や出力、建屋容積の違いを考慮して、ヘリウムガス炉の所内比率を推定した。本炉の所内比率は、ナトリウム炉にある1次および2次主循環ポンプ負荷がないこと、ガスタービン発電機設備の負荷が蒸気タービン発電機設備のそれより小さいこと等により、約2.8%と評価した。

(b) 定検工程に関する検討

① 定検工程に係るプラントの特徴

定検工程に影響するヘリウムガス冷却炉の特徴は以下の通りである。

- 熱出力2,400MWt、電気出力1,124MWe（4ループ）
- 制御棒駆動機構は炉心下部に設置されており、炉上部作業との干渉がない。但し、制御棒交換は炉上部から行う。
- ガスタービン直接発電であり、2次系、水蒸気系がなく、タービンは格納容器内設置となる。
- ガスタービン4基が格納容器内にあるため、この点検による定検の長期化を防ぐ方策が必要となる。
- 冷却材の循環はタービン軸に取り付けられた低圧および高圧コンプレッサで行うため、ナトリウム冷却炉でクリティカルとなっている1次主循環ポンプ点検がない。
- 冷却材がヘリウムのため、格納容器蓋開放時に冷却材が上方に拡散するのを防ぐため、キャスク等の機密設備が必要となる。
- 海水ポンプ等補機冷却設備は、2系統構成。
- 非常用系2系統設置し、非常用電源としてガスタービンを2基設置する。DRACSは50%容量×4基設置で、2基/1系統で非常用電源に接続される。
- 燃料交換作業中にガスの強制循環流が喪失しても燃料の温度上昇は自然冷却により低く抑えられる。
- 炉心高さは3.2m、燃料集合体は内側炉心246体、外側炉心192体、ブランケット144体、制御棒は31体である。
- 燃料交換バッチ数は7バッチで、運転サイクル長さ18カ月である。

② 定検工程策定の前提条件

定検工程策定に当たっては、以下の前提条件（各機器の設計条件等）を踏まえて検討した。

- 炉心崩壊熱除去は、解列後1日はガスタービン冷却、2日目以降

は崩壊熱除去系へ引き継ぐ。

- 原子炉冷却材圧力は、停止7日目以降大気圧とする。冷却材のヘリウムガスは崩壊熱除去運転中に5日間かけて回収する。逆に起動時のヘリウムガス供給は4日間で行う。
- 非常用ガスタービン発電機、海水系、補機冷却水系等は、原子炉冷却材圧力が大気圧となる停止7日目以降、1系統ずつ点検する。
- 燃料交換が停止22日目以降可能なように燃料取扱設備を設計する。
- 燃料交換方式は、燃料直接取り出しで水プール内に乾式貯蔵する。
- 機器等の仮置き、点検スペースは確保されている。
- 1日の作業時間は、通常8時間、シフト作業時22時間とする。
- 官庁検査のための曜日調整、時間調整はないものとする。
- ガスタービンは、電気事業法により $24 \pm 1$ カ月に1回の開放点検が義務づけられているが、本検討では将来の規制緩和を期待して、1定検当たり1基の開放点検を実施するものとする。即ち、4サイクル(約6年)に1回の点検となる。
- 再生熱交換器、前置冷却器、中間冷却器の伝熱管のISIは、漏洩の連続監視を想定し、定検期間中の特別な検査は実施しないものとする。

### ③ 定検工程検討結果

上記のプラントの特徴、前提条件を踏まえて、ナトリウム冷却炉の定検工程をベースにヘリウムガス炉の定検工程について検討した。定検工程表を表-11に示す。

ヘリウムガス炉のクリティカル工程は、降温→ガスタービン蓋開放のための炉心崩壊熱減衰待ち→ガスタービン点検(予備機との交換)→燃料交換・後始末→格納容器ハッチ漏洩試験→CRD性能試験→炉特性試験→昇温となり、標準定検としては40日程度、標準外定検としては格納容器全体漏洩率試験のために3定検毎に+5日必要となる。したがって、平均定検日数としては42日程度となる。

以下に、主要な点検項目に対する検討内容を示す。

#### a. CRD試験関係工程

CRDの試験としては、定検初期に行う作動試験、駆動部点検、燃料交換後に行う性能試験がある。この内、作動試験についてはCRDに不具合のないことを確認するために実施するものであるが、運転中の荷重監視、定検時の炉停止操作時にスクラムさせる等により確認できるため、省略可能である。但し、工程上はクリティカルパスになっていないので作動試験を見込んだ。

性能試験については、通常の定検を行うものとして工程を組んでいるが、制御棒本体が交換になることから使用前検査として官庁立会となる場合には1日程度工程が延びると考えられる。

b. ガスタービン点検工程

ガスタービンの点検は1定検当たり1基の開放点検を行うものとし、定検項目としてはタービン翼の目視およびPT、軸受けの目視点検を想定した。点検期間の短縮を図るため、ガスタービンを予め点検済の予備機（1基/2ユニット）に交換し、定検期間外に取り外したガスタービンの点検を行うケースをレファレンスとした。

（ガスタービンを1定検毎に1基点検する場合）

600MWt/281Mweクラスの発電用ガスタービンの点検実績は試運転終了までで、40日～45日程度（日勤ベース）である。本ガスタービンは、縦置きであること、および放射能を内包する機器であることによる作業低下を考慮して上記の1.2倍の点検期間を想定した。定検短縮を図るためには、天井クレーンを2基設置して炉上部作業とガスタービン点検を並行作業で行い、かつシフト体制で点検を行う必要がある。以上によりガスタービンの点検期間は天井クレーン2基設置でシフト25日と設定した。

尚、1定検当たり2基の開放点検を行う場合には天井クレーン3基とすれば、ほぼ同期間で定検可能となる。

（ガスタービン1基を予備機に交換）

上記で設定した25日の点検期間の内、タービン翼の目視およびPTの期間7日を予備機に交換することにより削減できる。予備機への入れ替え期間を1日とすると、このケースでの点検期間は19日となる。

c. 原子炉容器、炉心支持構造物等 ISI 工程

ISIの必要作業期間は、炉内のISI等冷却材が透明なためナトリウム炉より容易に検査可能と思われるが、同等の検査期間とした。

d. 燃料交換工程

交換対象燃料集合体数は、制御棒31体を含めて1定検当たり115体である。また、燃料集合体の全長がナトリウム炉の約1.8倍となっている。これらを考慮して工程を設定した。

e. 炉物理試験工程

本試験は、軽水炉での実績並に合理化されるものとして2日と設定した。

(c) 運転保守上の課題と開発計画

ヘリウムガス炉の運転保守上の課題としては、原子炉容器が200mmと

厚肉であることから、その I S I 装置の開発が挙げられるが、現状技術の延長上にあるので、フェーズ 3 以降に開発に着手することで良いと考えられる。

(v) 炭酸ガス冷却炉

(a) 定検工程に関する検討

① 定検工程に係るプラントの特徴

定検工程に影響する炭酸ガス冷却炉の特徴は以下の通りである。

- 熱出力 3,600MWt、電気出力 1,500MWe（4ループ）でナトリウム炉でいう 2 次系はない。
- 原子炉容器は、鋼製ライナー付 PCRВ であり、ライナー内側は断熱材で覆われている。また、全ての 1 次系機器は PCRВ 内に設置されている。
- 制御棒駆動機構は炉心下部に設置されており、炉心上部機構やそれに繋がる回転プラグ等炉上部構造がない。但し、制御棒交換は炉上部から行う。
- 冷却材の循環は、2 基/系統×4 系統のガス循環機により行い、メインボイラー（熱交換器）3 基/系統×4 系統で蒸気を発生させ、蒸気タービンを回して発電する。
- ガス循環機は、予備機を 2 基（1 基/ユニット×ツイン）準備し、定検時は交換のみ行い、運転中に点検する。
- DG は 4 基設置し、通常運転中は 1 基でガス循環機 2 基に電源を供給するが、定検停止中はメンテナンスモードとしてガス循環機 4 基に電源を供給する。また、DG は 1 2 MW 程度の大容量となっている。
- 補機冷却系海水ポンプは、1 0 0 %×4 基で、補機冷却水系は 2 系統である。
- 燃料交換機、燃料出入機での燃料取扱中は 3 系統のガス冷却系により燃料を冷却する。
- 燃料集合体は 814 体、制御棒は 33 体である。
- 燃料交換バッチ数は 5 バッチ（燃料等交換体数 196 体）で、運転サイクル長さは 24 カ月である。

② 定検工程策定の前提条件

定検工程策定に当たっては、以下の前提条件（各機器の設計条件等）を踏まえて検討した。

- 停止 5 日後以降は大気圧まで減圧しても、定格運転時の約 50% 体積流量あれば炉心崩壊熱除去が可能である。このため定検中を通

してガス循環機5基以上、DG2基以上を確保できるように各機器の点検を行う。従って、停止後5日目以降、DG、補機冷却系、ガス循環機等の点検に着手可能となる。

- 原子炉冷却材圧力は、停止5日目以降大気圧とするが、AGRと同様に遠隔検査を行うこととし、空気置換は行わない。
- 機器の点検は、AGRと同じく1/4区画/1定検を点検対象とする。即ち、ガス循環機等の点検は4定検に1回でよいものとした。
- ボイラ（熱交換器）の伝熱管については、東海1号と同じくISIは実施せず、特定箇所の肉厚測定、外観検査を実施するものとする。
- PCRV、ライナーおよび断熱材の検査については、国内基準がないため英国基準を満足するものとする。
- 燃料交換が停止26日目以降可能なように燃料取扱設備を設計する。
- 燃料交換方式は、燃料直接取り出しで水プール内に裸で浸漬貯蔵する。
- 機器等の仮置き、点検スペースは確保されている。
- 1日の作業時間は、通常8時間、シフト作業時22時間とする。
- 官庁検査のための曜日調整、時間調整はないものとする。

### ③ 定検工程検討結果

上記のプラントの特徴、前提条件を踏まえて、ナトリウム冷却炉の定検工程をベースに炭酸ガス炉の定検工程について検討した。定検工程表を表-12に示す。

炭酸ガス炉のクリティカル工程は、炉心崩壊熱減衰待ち→補機冷却系点検（DG点検）→燃料交換・後始末→格納容器ハッチ漏洩試験→CRD性能試験→炉特性試験→昇温となり、標準定検としては45日、標準外定検としては格納容器全体漏洩率試験のために3定検毎に+5日必要となる。したがって、平均定検日数としては約47日となる。

以下に、主要な点検項目に対する検討内容を示す。

#### a. CRD試験関係工程

CRDの試験としては、定検初期に行う作動試験、駆動部点検、燃料交換後に行う性能試験がある。この内、作動試験についてはCRDに不具合のないことを確認するために実施するものであるが、運転中の荷重監視、定検時の炉停止操作時にスクラムさせる等により確認できるため、省略可能である。但し、工程上はクリティカルパスになっていないので作動試験を見込んだ。

性能試験については、通常の定検を行うものとして工程を組んでい



るが、制御棒本体が交換になることから使用前検査として官庁立会となる場合には1日程度工程が延びると考えられる。

b. ガス循環機点検

ガス循環機点検は、AGR の定検と同じく1定検当たり2基/8基を予備機に交換するものとし、クリティカルとなるのを避けた。点検頻度は8年毎となるが、AGR と同等である。

但し、定検中も5基以上のガス循環機を確保する必要があるので、電源の DG とガス循環機冷却系の確保が図れるよう詳細な運用を検討する必要がある。

c. 原子炉容器、炉心支持構造物等 ISI 工程

ISI の必要作業期間は、炉内の ISI 等冷却材が透明なためナトリウム炉より容易に検査可能と思われるが、同等の検査期間とした。

PCRIV に関する国内基準はないため、AGR に適用されている英国基準に準拠して検査するものとした。PCRIV コンクリート表面の目視検査によるコンクリートの亀裂、変形の有無や冷却パイプからの水漏れの形跡の確認、コンクリート内のひずみ(ひずみゲージ)、温度測定(熱電対)、炭酸ガス漏洩モニタによる断熱材やライナーの健全性確認、ISI カメラによる断熱材表面(カバープレート)の健全性確認、レーザー等の光学測定系によるトップスラブ等での PCRIV の変形確認、テンドンの抜き取り検査(運転中)等を行う。

d. ボイラー点検

炭酸ガス炉では、2次側の圧力が高く、伝熱管破損時には蒸気が PCRIV 内にリークインするのみであり、冷却材の流出(減圧事故)にはならない。また、蒸気侵入による反応度投入は負であり、反応度事故にはならないし、冷却材と蒸気の反応も起こらない。したがって JEAC-4205 に準拠すれば体積検査は不要である。

以上により、ボイラーの検査としては、東海1号と同様に伝熱管の特定箇所の肉厚測定、外観検査程度を実施するものとした。尚、ボイラー部での湿分モニタは実施する。

e. DG、補機冷却系点検

DG、海水ポンプは、それぞれ4基となっているが、点検を並行実施することとし、ナトリウム炉と同期間で実施できるものとした。

f. 燃料交換工程

交換対象燃料集合体数は、制御棒33体を含めて1定検当たり138体である。炉内中継位置が1ヶ所であることから、1体あたりの取扱い時間を約60分とナトリウム炉より長く設定した。

g. 炉物理試験工程

本試験は、もんじゅでの今後の試験実績を踏まえた合理化、試験デ

ータのコンピュータ即時処理化により、軽水炉での実績並に合理化されるものとして2日と設定した。

(b) 運転保守上の課題と開発計画

炭酸ガス炉については、AGRをベースとしており英国基準を満足しているので、成立性に係わるような運転保守性の課題はないと思われる。

(vi) もんじゅを用いた確立・実証が期待される実用化に向けた運転保守技術

「もんじゅ」に期待されるFBR実用化に向けた運転保守技術として第一に挙げられるのは、送電網に組み入れ、信頼できる発電設備として期待することができることを実証すること、即ち安全・安定な運転を達成することである。更にこれを達成した上で運転保守経験を積み、改善しながら以下のような運転保守技術を確立・実証していくことが期待される。

特に、FBR実用化に向けて軽水炉に比肩する発電コストを達成するためには、軽水炉並の定検工程が達成できることが必須であり、これを裏付け、実証していくことが重要である。このため、特にFBR固有の定検作業項目について定検として工程管理した実績がないこと、実用化に向けた定検工程の検討にあたってもんじゅの設備点検実績、機能試験結果等を基に合理化を見込んでいること等から、今後もんじゅで定検実績を積みながら改善を図り、定検工程を合理化・短縮化していくことが期待される。

(a) 定検合理化（短縮）技術の確立・実証

① 定検工程管理技術の確立、運用

定検を全体として工程管理し、これを合理化して短縮を図っていくことが重要である。軽水炉においても定検実績を積みながら、設備の改良、作業相互の調整による手待ち時間の排除、検査の合理化、一括隔離手順の整備等を進めて合理化を図ってきている。

もんじゅにおいても定検の経験はなく、今後実績を積みながら定検の合理化、短縮化を進めていく必要がある。特に、CRD駆動部点検、炉内外計装点検等の炉上部作業と1次主循環ポンプ点検等のクレーンや機器、装置・工具類の仮置き・点検スペースの取り合いなどを含めた各種作業の工程調整経験を蓄積し、各種作業の手待ち時間の排除方策、点検架台の追設やクレーンの高速化といった設備改善による定検期間の短縮方策、各種作業の円滑な実施や誤操作・トラブル防止を踏まえた系統隔離手順の簡素化・単純化（一括操作化）方策、習熟等を踏まえた作業の効率化・短縮化方策等を確立していくことが重要である。

② 実用化に向けた主要作業の合理化・短縮化の実証

実機の定検の合理化・短縮化を進めるためには、まず定検作業全体を経験してクリティカルパスを明確にし、その取り扱い条件等を踏まえて全体の合理化を検討していく必要があるが、実用化に向けては特に以下の点が重要と考えられる。

a. CRD 駆動部点検作業

もんじゅにおいては、駆動部を取り外して工場に持ち帰って点検後取り付けるという作業となっているため、長期間を要している。実用化に向けてはこの作業期間の大幅短縮のため、予備品を具備し定検中は交換のみ行い、定検終了後点検することとしており、この効果を実機で確認しておく必要がある。

b. CRD 作動試験・性能試験

CRDの試験としては、CRD点検前に行う作動試験、駆動部点検および制御棒・燃料交換後に行う性能試験がある。この内、作動試験についてはCRDに不具合のないことを定検初期に確認し、起動前に実施する性能試験等で不具合がみつかった工程が後戻りする可能性を排除するために実施するものである。したがってこの作動試験は運転中の荷重監視、定検停止時にスクラムさせることによる動作確認あるいは部分的な作動試験による動作確認等で十分その目的を達成できる可能性が高く、今後もんじゅで試験による実績・評価を積んでCRDの信頼性を確認することにより、合理化していくことが望まれる。

CRD性能試験は、制御棒位置ゼロ調整、常駆動試験および落下試験から成るが、100%流量と10%（ポニーモータ）流量の両方で実施、かつ各試験を3回実施している。これらについては、軽水炉と同様、試験データを蓄積・評価し合理化していくことが望まれる。

c. 1次主循環ポンプ点検作業

1次主循環ポンプのメカニカルシールは、工場持ち帰り点検としているため長期間を要している。実用化に向けてはこの期間の短縮を図るため、予備品を具備することとしており、この合理化効果をもんじゅで実証することが望まれる。

d. 制御棒・燃料交換およびその準備・後片付け作業

燃料交換準備および後片付け作業の短縮を目指した、燃料交換機等輸送キャスク、プラグ取扱装置等の適正員数、ガス置換作業の効率の実施方法（回数、手順等）等確立し、実用化に向けた設計に反映することが望まれる。

燃料交換作業については、もんじゅの機能試験で作業性の確認がな

されているが、今後燃料集合体の照射による曲がりデータの取得と引き抜き・挿入性の確認および使用済燃料による工程の実証が必要となる。更に、工程短縮の観点から、燃料交換機側作業と燃料出入機側作業の完全並行作業化（もんじゅでは燃料出入機側のドアバルブの操作を燃料交換機の操作盤から行う必要があるためと思われるが、この操作を燃料交換機側作業に組み込んで実施しており手待ち時間が生じている）、コンピュータ機能の向上による機器作動指令時間の短縮等合理化を進め、その効果を実証することが望まれる。

制御棒交換作業については、工程短縮の観点からは制御棒の長寿命化を図って交換本数を削減することが最も有効な方策であり、実用化に向けた長寿命制御棒（ナトリウムボンド・シュラウド付制御棒）をもんじゅに採用しその健全性を実証していくことが重要である。

#### e. 炉特性試験の合理化

数回の炉特性試験を行い、平衡に達した炉心においては、基本的に設計の妥当性は確認されており、詳細な試験を実施する意味は少ない。従って、軽水炉と同様、設計の妥当性を確認するキーとなるデータ（例えば、臨界点予測）、安全上確認すべきデータ（例えば、停止余裕、過剰反応度）、運転上必要なデータ（例えば、微調整棒の制御棒価値）等を効率的に取得・評価する手順（データ処理の自動化含む）を確立して、試験の合理化を実証することが望まれる。

#### (b) 点検・保守基準の確立

保守・点検実績およびトラブル・故障等実績を蓄積し、設備、機器部品等の点検内容、点検交換頻度等の合理的な点検・保守基準を確立することが望まれる。

#### (c) 保守・補修技術の高度化・実証

実機運転の大きな意義の一つは、トラブル・故障等を経験し、それを克服することによって技術を改良・向上させていくことである。もんじゅでの運転保守経験を踏まえて、設備の改良・改善を図り合理化・高度化し、実用化に向けた設計に反映すると共に、運転保守技術、ナトリウム取扱い技術として確立していくことが重要である。

プラントの安定運転のためにはトラブルによる長期停止を回避することが重要であり、このためにはトラブルを早期に検知し拡大防止を図ることのできる技術を開発・確立する必要がある。この観点から、異常監視・診断技術、構造健全性モニタリング技術、ナトリウム漏えい検知技術、SG水漏えい検知技術等を高度化し、もんじゅという実機環境下でその有効性

を検証することが望まれる。これら技術の確立には長期間を要するため、着実に推進していく必要がある。

また、被ばく低減に向けた取り組みも重要であり、実機の放射線作業環境、腐食生成物等の蓄積挙動、作業用遮へいの有効性等の実績を踏まえて、実用化に向けて遮へい等の合理的な設計に反映を図ると共に、作業時の被ばく低減方策を確立していくことが望まれる。

表-1 所内負荷率の比較

	実証炉		もんじゅ		軽水炉 (110万kW級)
電気出力(MWe)	671		283		
ループ数	3		3		4
所内負荷率(%)	5.9		10.9		4.2
負荷種別	負荷容量(MW)	比率*	負荷容量(MW)	比率*	比率*
原子炉冷却系統設備	18.97	0.79	10.18	1.00	0.50
(1次主冷却系)	11.82	0.69	7.21	1.00	0.70
(2次主冷却系)	7.15	1.02	2.97	1.00	0.00
タービン発電機設備	8.71	0.57	6.41	1.00	0.90
換気空調設備	5.22	0.31	7.16	1.00	0.03
補機冷却系統設備	1.26	0.17	3.05	1.00	0.14
予熱ヒーター設備	0.27	0.08	1.40	1.00	0.00
その他	5.16	0.86	2.54	1.00	0.14
(圧縮空気供給系)	0.24		0.19		
(計装電源)	1.01		} 1.64		
(照明、雑動力電源)	0.55				
(燃料取扱設備)	0.25		} 0.64		
(炉外燃料貯蔵設備)	0.76				
(使用済燃料プール)	0.06				
(廃棄物処理系)	0.10				
(機器洗浄設備)	1.06				
(管理建物電源)	0.36				
(電源損失)	0.78				
合計	39.58		30.74		

( )内は内訳を示す。

\*)もんじゅの各負荷を1.0として、電気出力を考慮して正規化した比率。

表-2 ユーティリティ使用量の推定結果

平成7年 9月	<p>出力試験</p> <p>9/5 : 原子炉停止</p> <p>原子炉停止 (ホットウェル清掃)</p> <p>A/日 ←-----→ B/日</p> <p><math>A/日 \times 5日 + B/日 \times 25日 = 9月の月間使用量 \dots\dots(1)^*</math></p>
平成7年 11月	<p>11/7 : 原子炉起動</p> <p>40%出力試験</p> <p>原子炉停止 (所内変圧器へ切替え)</p> <p>B/日 ←-----→ A/日</p> <p><math>B/日 \times 7日 + A/日 \times 23日 = 11月の月間使用量 \dots\dots(2)^*</math></p>

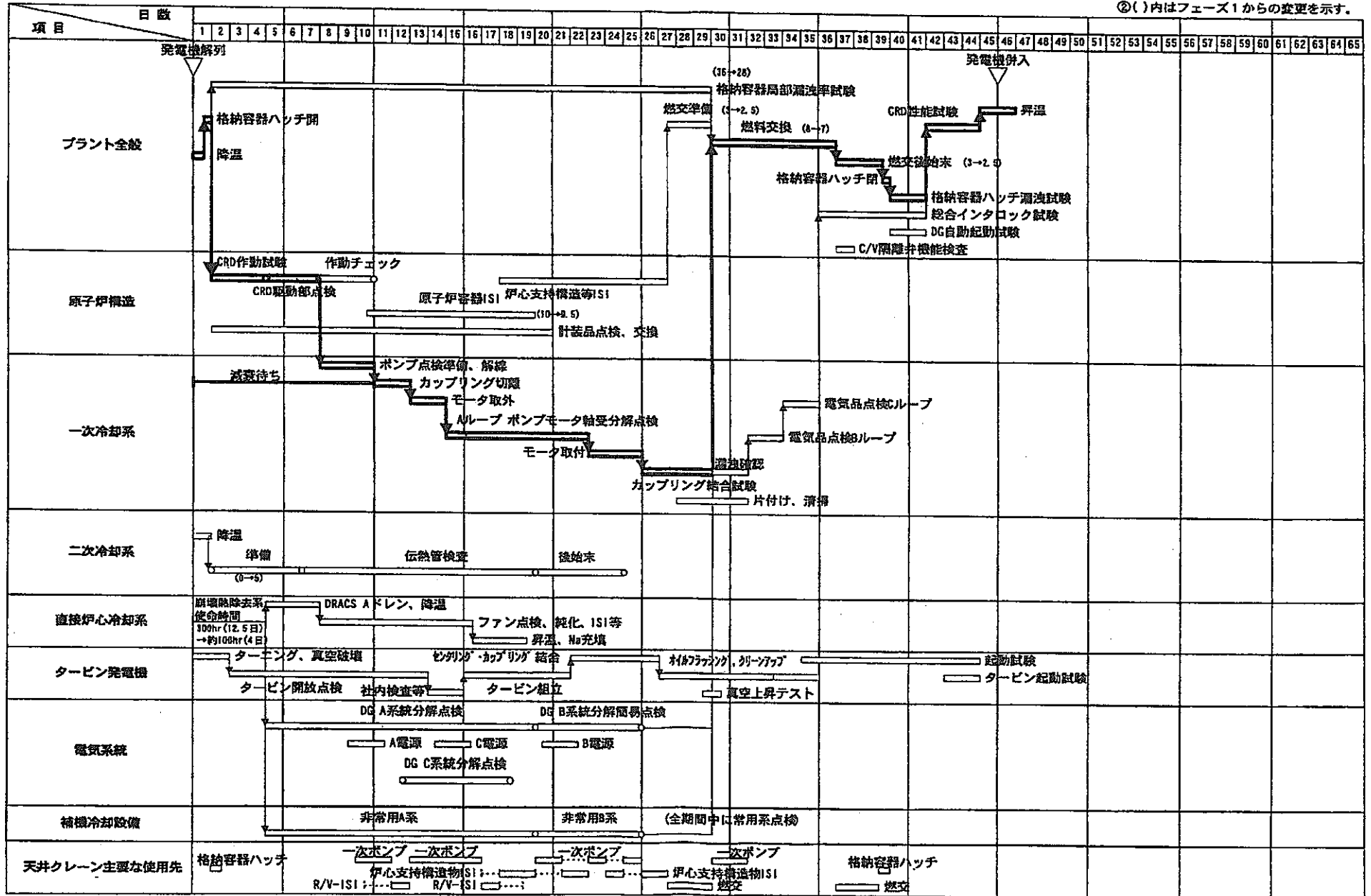
\*) (1)および(2)式を連立してA/日、B/日を算出。

	使用実績				月間使用量の推定結果	
	9月		11月		運転中	停止中
	運転日数	停止日数	運転日数	停止日数	A/日×30日 (百万円*)	B/日×30日 (百万円*)
軽油 (補助ボイラ)	5日	25日	23日	7日	1400kl (84)	140kl (8)
軽油 (D/G)	5.3kl		1100kl		1.3kl/回 (0.2 ; 3回/月として算出)	
ガス (アルゴン)	21000m3		2.5kl (試運転2回)		36000m3 (23)	18000m3 (11)
ガス (窒素)	91000m3		91000m3		91000m3 (6)	91000m3 (6)
(合計)					(113)	(25)

\*) コストは、積算資料 (H12年1月号) に基づき各単価を軽油 : 60円/l、Arガス : 630円/m<sup>3</sup>、N<sub>2</sub>ガス : 65円/m<sup>3</sup>として算出。

表-3 実証炉（フェーズ2）の定期検査工程

【備考】  
 ①本線は、クリティカルパスを示す。  
 ②( )内はフェーズ1からの変更を示す。



- 50 -



表-4 実証炉ともんじゅの主要定期検査工程

区分	項目	作業内容	数量	実証炉		体制	前提条件	作業内容	数量	もんじゅ		前提条件	実証炉工程の妥当性評価
				クリティカル	クリティカル外					クリティカル	クリティカル外		
プラント全般	燃料交換	準備	199体	2.5日	3交替	マニプレータ式FHM 直動式FHM ITVM炉内常設方式 初期段階炉心対象	準備	燃料交換	5日	3交替	約100時間	機器移送用キャスク等の増台、横倒し不要とする等改善されているが70時間(3.5日)程度は要すると思われる。 燃料交換機側作業と燃料出入機側作業の完全並行作業化、回転プラグの高速化、計算機指令時間の短縮、燃料交換機の巡回点の変更等により、60分/体程度まで短縮可能と考えられ、燃交期間としては8.5日となる。	
		燃料交換		7日			15日		2交替				90分/体
		後始末		2.5日			5日		3交替				約100時間
	格納容器	格納容器ハッチ開閉	5日	5日									
		貫通部局部漏洩率試験(B,C種) ハッチ漏洩試験	B種:80ヶ所 C種:20ヶ所	28日	3交替	検査箇所30%を並行作業実施	貫通部局部漏洩率試験(B,C種)	B種:53ヶ所 C種:68ヶ所	約70日				軽水炉の実績からクリティカルになるような作業ではないと考えられる。
	降温				5日								
昇温				1日		原子炉特性試験含む			10日			軽水炉の実績でも2日を要しており、最小停止余裕及び過剰反応度測定が官庁立金と考えられるので少なくとも2日は要する	
原子炉構造	CRD駆動機構	CRD作動試験	30体(全数)	3日			CRD作動試験	19体(全数)	4日				
		駆動部切離し 駆動部取外・取付	10体	1日 2日		予備品と交換	駆動部取外 駆動部分解点検 駆動部取付	10体	8日 10日	67日	取外したCRDは、工場で点検実施	CRD駆動部の取外・取付作業は、実証炉のように駆動部予備品を準備し交換のみを行うのであれば、もんじゅでも同様に短縮可(駆動部取外時、駆動軸の固定作業に時間を要している)	
		駆動部点検(電気試験、漏洩試験)	30体(全数)	4日									
		性能試験(CRファッパ、常駆動試験、スクラム試験)	30体(全数)	3日	2交替	官庁検査は、記録確認として立金検査はないものとする。	性能試験	19体(全数)	10日		官庁立金検査10体含む	実証炉並の期間で実施するためには、もんじゅでの実績を踏まえた試験項目の必要最小限化、複数制御棒の試験の並行実施等工夫が必要。	
1次冷却系	計装品	点検・交換	中性子計装:2or3体 温度計装:約100本 液位計装:4本	19日		原則として検出器のみ交換	点検・交換		68日			天井クレーンの取り合い調整が必要。	
		点検準備、減速待ち		10日	3交替	軸封部は予備品と交換する。	点検準備	1基(A)	約30日	取外した軸封部は工場で点検実施	軸封部予備品を準備し交換のみを行うのであれば、もんじゅでの実績から15日程度で可能と考えられ、モータの分解点検を考慮しても20日程度(作業場所の確保要)で実施可能と考えられる。		
	カップリング切離、モータ取外	4日	軸封部点検										
	軸封部点検	8日	モータ取付										
	モータ取付	3日	試運転	3基			4日						
主冷却系	Naドレン	Naドレンしない				Naドレン	1ループ(A)		2日	Naをドレンし実施	Naをドレンしなければ、1次主循環ポンプ点検がクリティカルになる		
						本格点検			15日				
その他	電気品点検	2ループ(B,C)	4日		Naはドレンしない	予熱	1ループ(B)		10日	Naをドレンし予熱ヒータ点検等実施 CループについてはAループ点検時に並行実施			
						Na充填			2日				
						Naドレン			2日				
						簡易点検			9日				
2次冷却系	蒸気発生器	伝熱管検査	1基(A)	23日		Naをドレンせずに実施(カバースで加圧し、伝熱管外周のNaを排除) 150℃程度の温度で実施	1基(A)		17日 20日 16日	伝熱管温度40℃以下で実施			
						ドレン・降温 過熱器伝熱管検査 予熱・充填			17日 15日 16日				
Na・水反応生成物収納設備	ラプチャーディスク交換	1ループ(A)			Naはドレンしない	ドレン・降温 ラプチャーディスク交換 予熱・充填	1ループ(A)		10日 29日 16日	伝熱管温度60℃以下で実施			

計 45日

118日

注)冷却系については例としてAループを本格点検するケースとした

表-5 ナトリウム冷却ループ型炉 定期検査工程

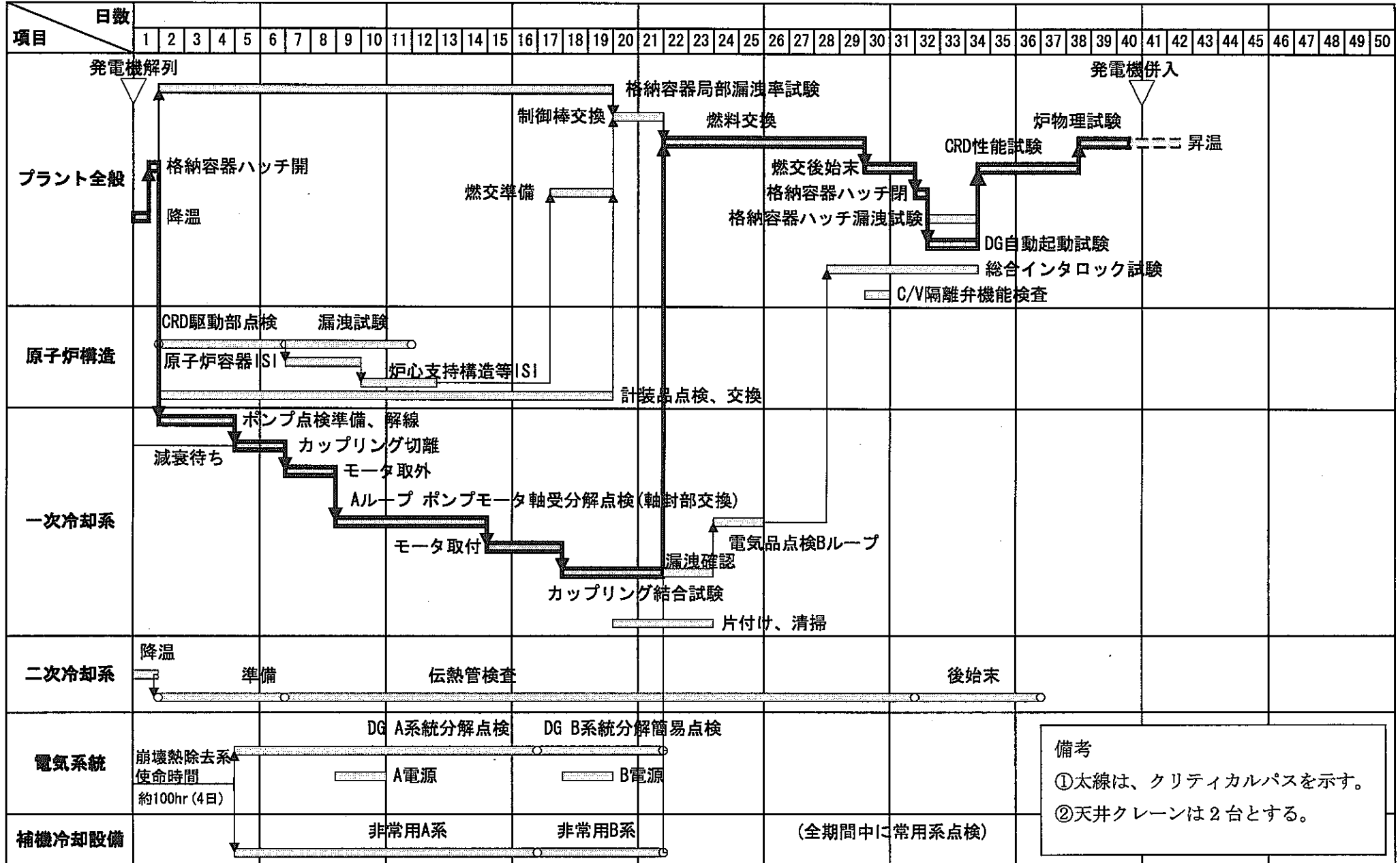


表-6 ナトリウム冷却ループ型中型モジュール炉 定期検査工程

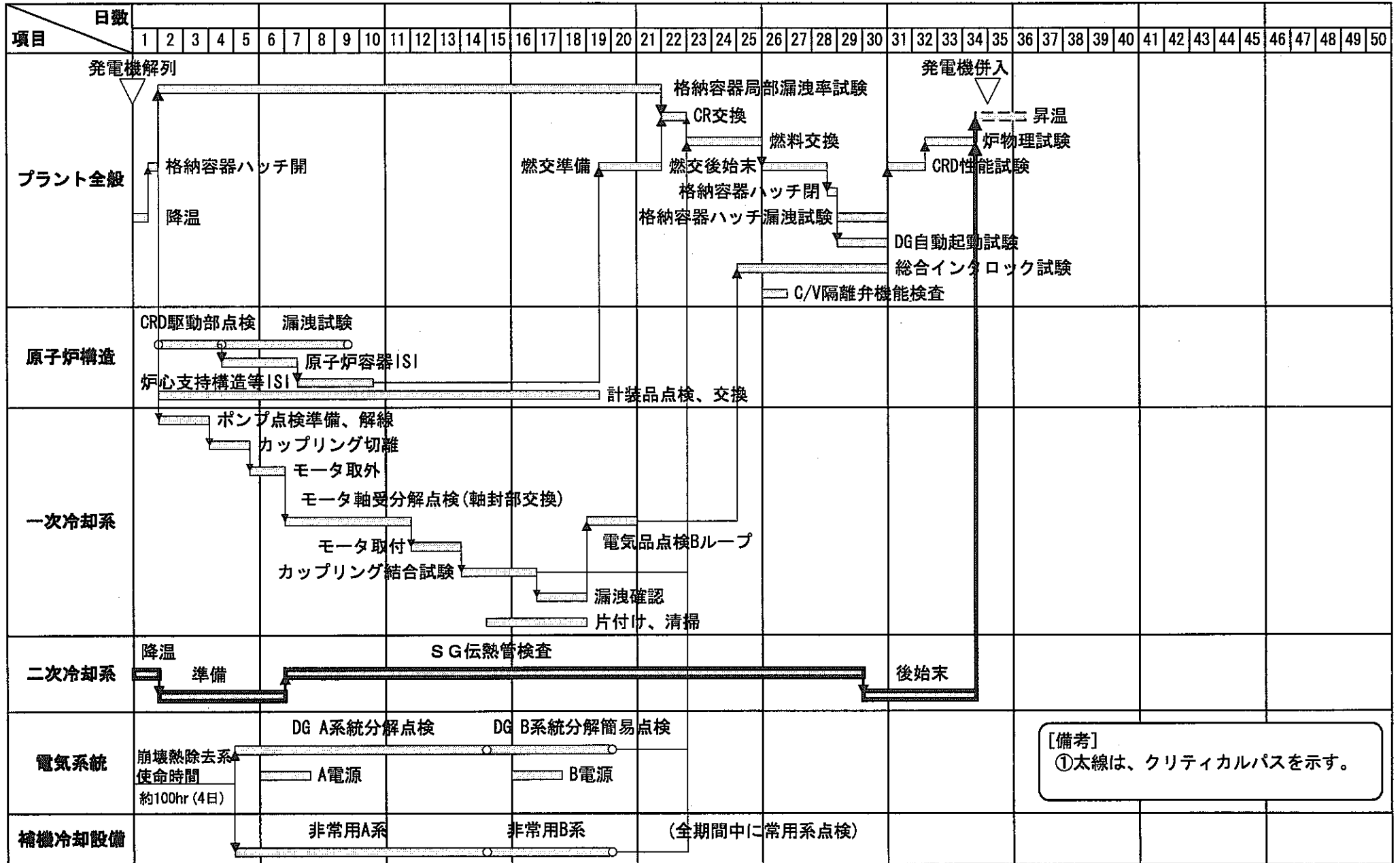


表-7 ナトリウム冷却タンク型炉 定期検査工程

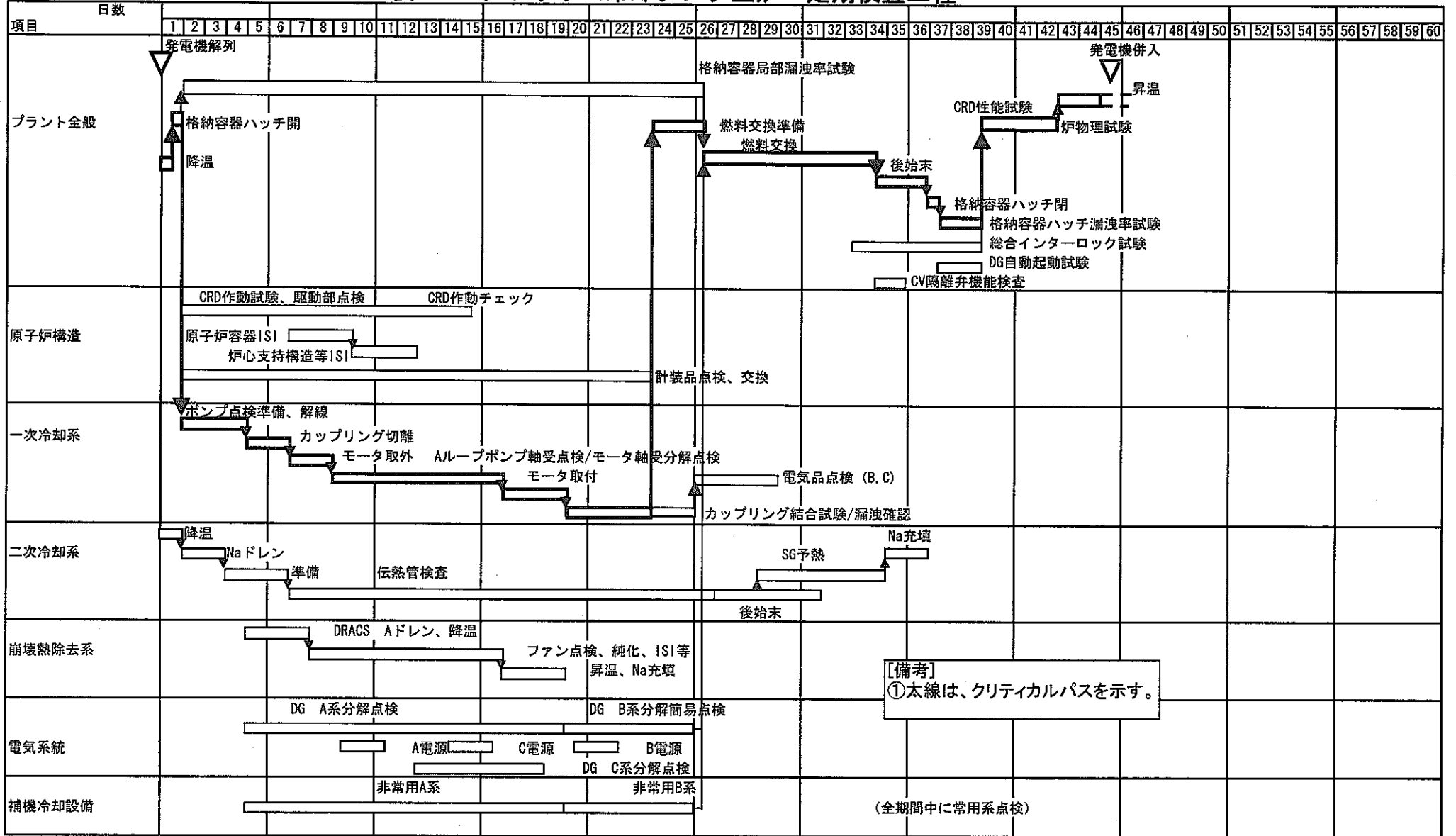


表-8 中型ナトリウムタンク型炉 定期検査工程

項目	日数																																																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
プラント全般	発電機解列															格納容器ハッチ開															格納容器ハッチ閉															発電機併入														
原子炉構造	CRD作動試験、駆動部点検										CRD作動チェック										原子炉容器ISI										炉心支持構造等ISI										計装品点検、交換																			
一次冷却系	ポンプ点検準備、解線					カップリング切離					モータ取外					Aループポンプ軸受点検/モータ軸受分解点検					モータ取付					電気品点検 (B, C)					カップリング結合試験/漏洩確認																													
二次冷却系	降温					Naドレン					準備					伝熱管検査					SG予熱					Na充填					後始末																													
前壊熱除去系	ファン点検										後始末																																																	
電気系統	DG A系分解点検										A電源										C電源										B電源										DG C系分解点検																			
補機冷却設備	非常用A系										非常用B系																				(全期間中に常用系点検)																													

注) 太字はクリティカルパスを示す。

表-9 鉛-ビスマス冷却炉 所内負荷推定

No	系統名	鉛-ビスマス冷却炉		Na実証炉フェーズ2設計		所内負荷率推定根拠
		マンテナンス時	定格運転時	マンテナンス時	定格運転時	
1	原子炉構造	360	106	75	22	制御棒本数比率で推定(36*4/30=4.8) 制御棒が1モジュール36本あり、4モジュールとする
2	1次主冷却系	0	0	263	11,800	自然循環の採用によりポンプ削除
3	2次主冷却系	0	0	0	7,030	2次系削除によりなし
4	1次Na純化系	98	41	41	17	4モジュールの出力との比2.383倍
5	1次Arガス系	7	7	3	3	4モジュールの出力との比2.383倍
6	2次Arガス系	0	0	30	0	2次系削除によりなし
7	2次補助Na、Pb系	0	0	93	93	2次系削除によりなし
8	水漏えい輸出系	0	0	0	0	固体電解質型水素計、酸素系の採用により削除
9	捕機冷却系	2,121	3,003	890	1,260	4モジュールの出力との比2.383倍
10	タービン発電機設備	0	20,941	0	8,786	4モジュールの出力との比2.383倍
11	換気空調設備	12,955	12,955	5,218	5,218	原子炉建屋体積比率と出力比率で推定 1.042*2.383=2.483倍
12	廃棄物処理系	448	448	188	188	4モジュールの出力との比2.383倍
13	燃料取扱設備	82	149	137	250	出力比率で推定、1炉分で共用 1モジュールの出力との比0.596倍
14	炉外燃料貯蔵設備	0	0	777	757	EVST削除合理化により負荷削除
15	機器洗浄設備	632	632	1,060	1,060	出力比率で推定、1炉分で共用 1モジュールの出力との比0.596倍
16	使用済燃料プール	36	36	61	61	出力比率で推定、1炉分で共用 1モジュールの出力との比0.596倍
17	圧縮空気供給設備	560	560	235	235	4モジュールの出力との比2.383倍
18	直接炉心冷却系	120	0	1,104	0	ダンパのみ
19	予熱設備	191	191	1,159	272	1次純化系のための、実証炉の2次充填、ダンプタンク、C/Tの計(約80kw)の出力倍とする。
20	計測制御電源	2,407	2,407	1,010	1,010	1次純化系のための、実証炉の2次充填、ダンプタンク、C/Tの計(約80kw)の出力倍とする。
21	照明設備	1,366	1,366	550	550	原子炉建屋体積比率と出力比率で推定 1.042*2.383=2.483倍
22	総合管理建物電源	429	429	360	360	4モジュールの出力との比2.383倍 となるが、大きすぎるため 事務棟まで出力倍は上げざと 考え2.383*0.5倍とした。
23	電源損失	436	865	265	779	1~22項の合計の2%
24	発電機励磁用電源	0	0	0	0	ブラシレス励磁機の採用により送電端出力から容量を除外
所内負荷合計(kW)		22,248	44,136	13,519	39,751	
定格電気出力(MWe)			1,600		671	
所内負荷率(%)			2.8		5.9	

	Pb-Bi	実証炉
出力	400	671.3
ユニット	4	1
全出力	1600	671.3
建物体積	20	19.2
出力比(1モジュール)	0.596	
全出力比	2.383	
体積比	1.042	
全出力・体積比	2.483	

[備考]: Na実証炉フェーズ2設計の所内負荷率より鉛-ビスマス炉の所内負荷を推定。

表-10 鉛-ビスマス冷却炉 定期検査工程

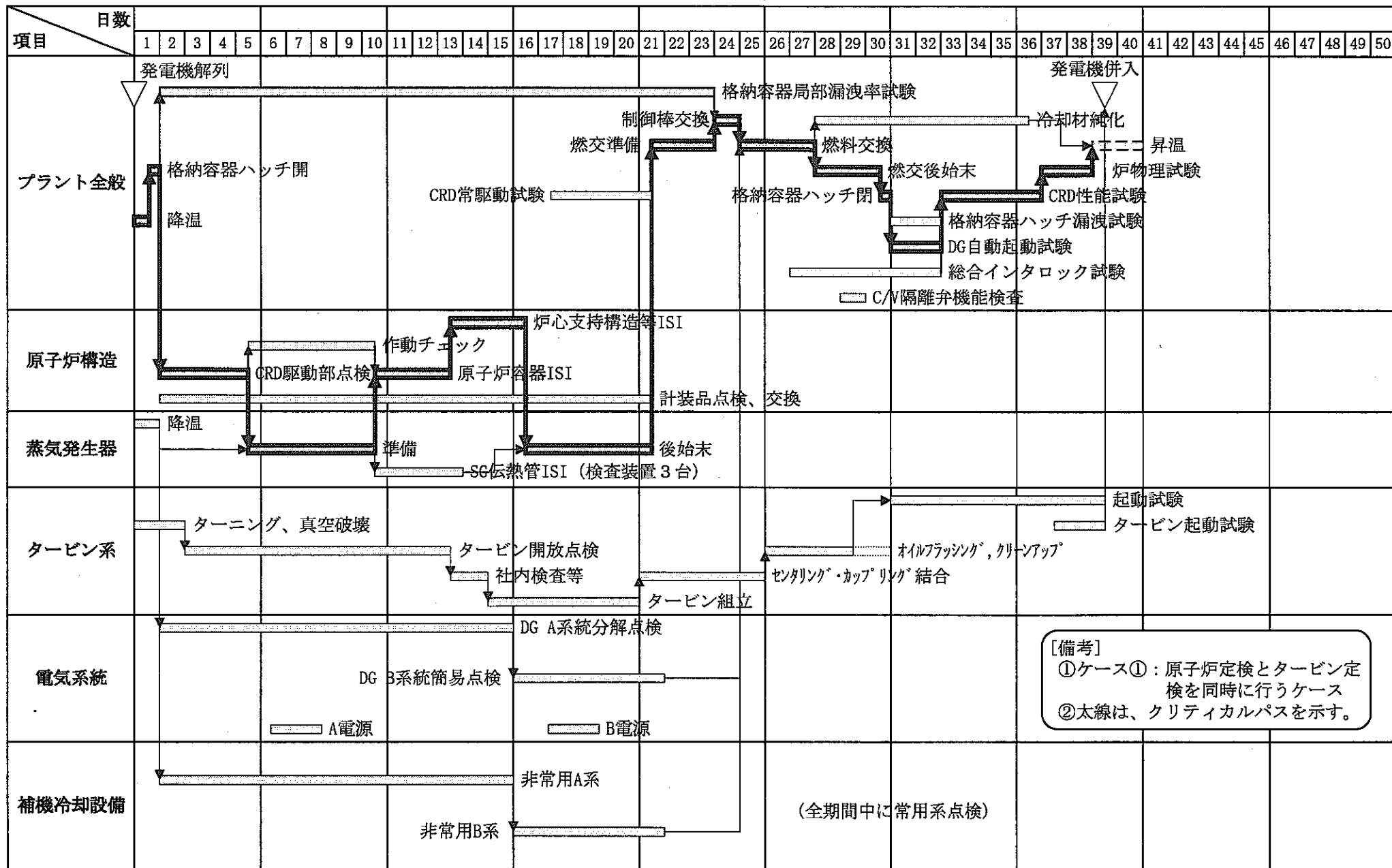


表-11 ヘリウムガス炉 定期検査工程

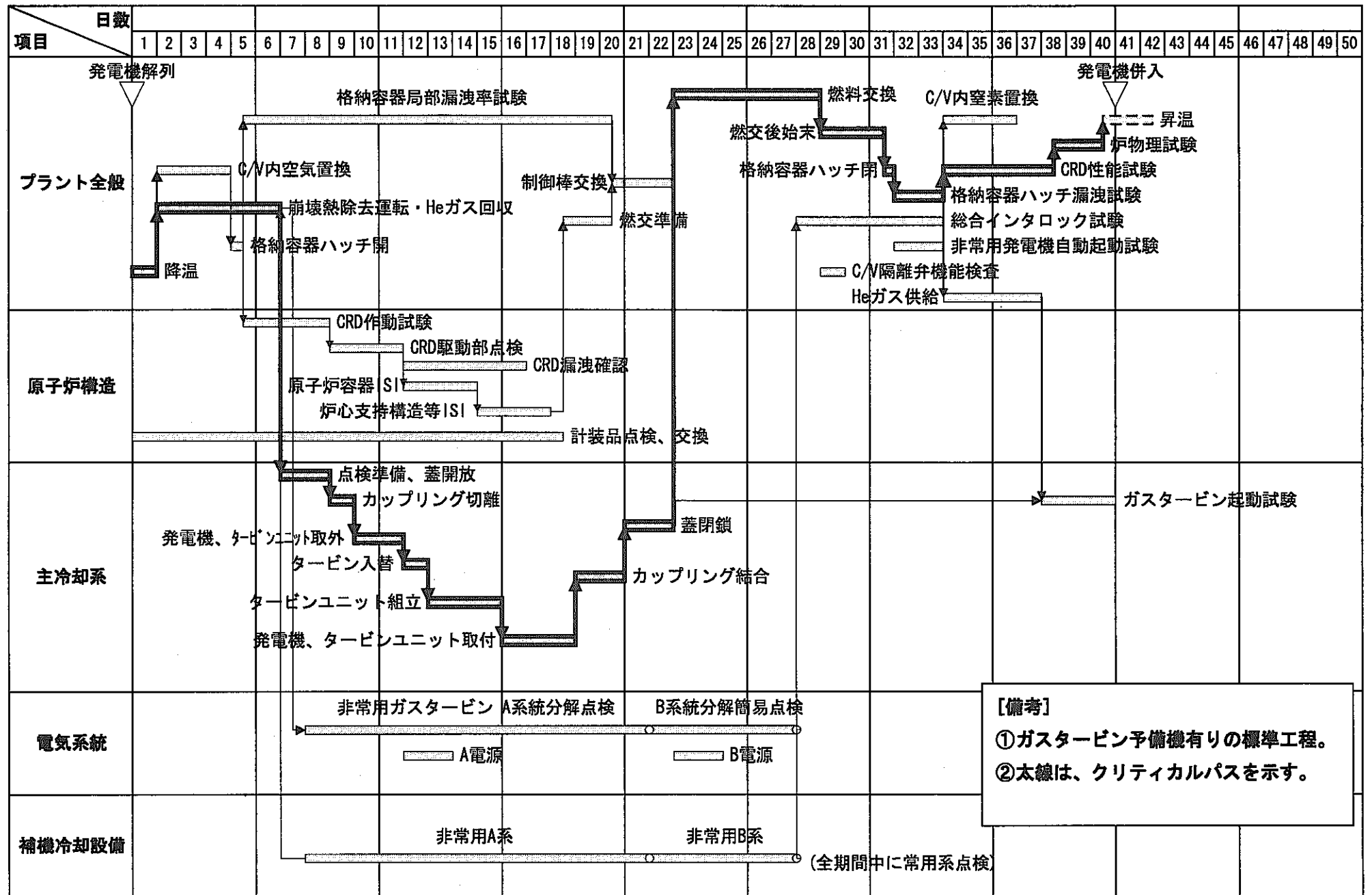




表-12 炭酸ガス炉 定期検査工程

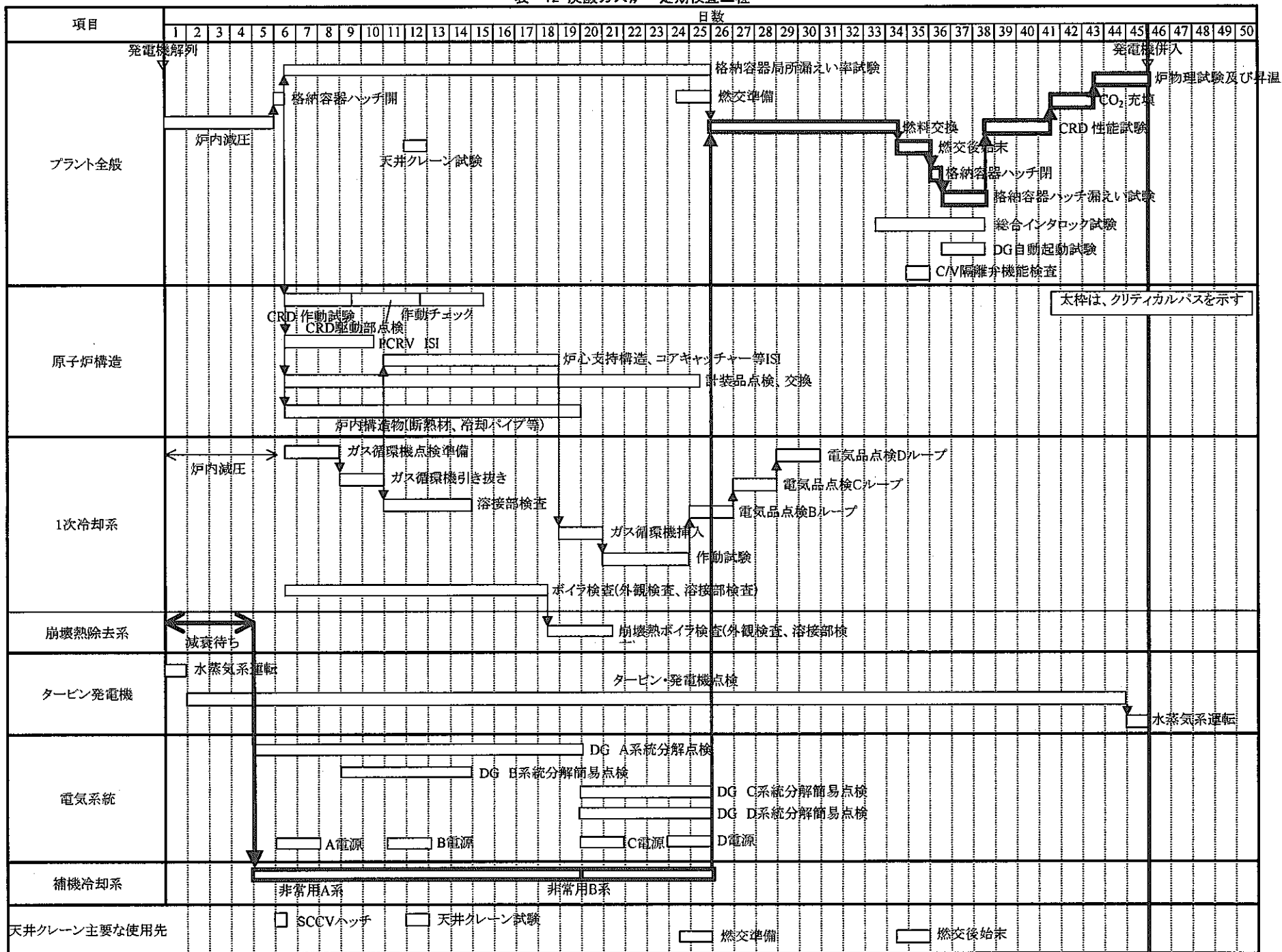
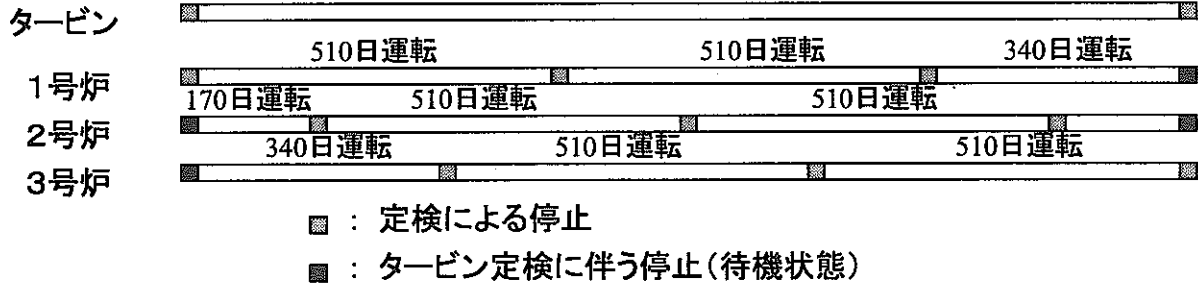


表-13 モジュール炉の標準定期検査パターン

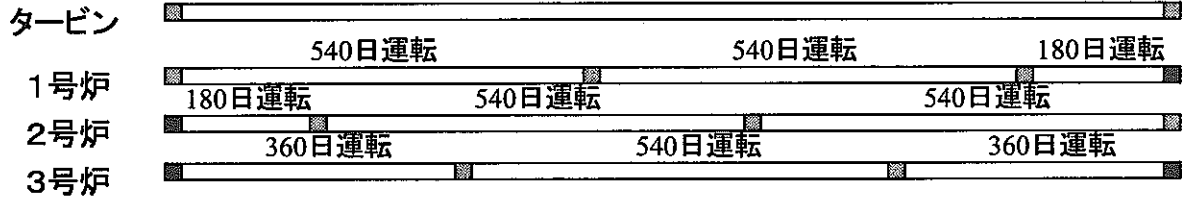
1. ナトリウム冷却ループ型モジュール炉

1428日運転<1460日(4年)



2. ナトリウム冷却タンク型モジュール炉

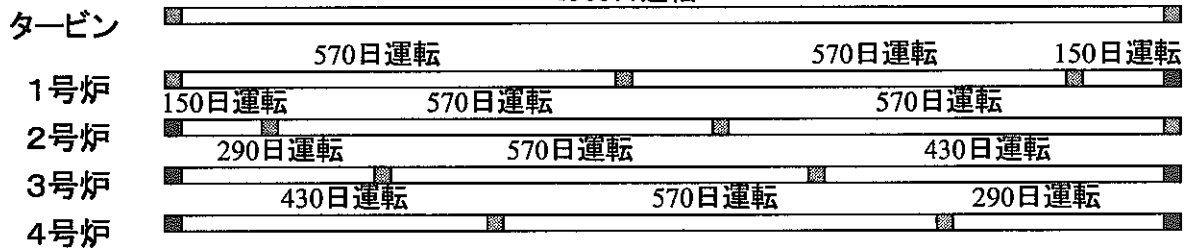
1336日運転



3. 鉛-ビスマス冷却モジュール炉

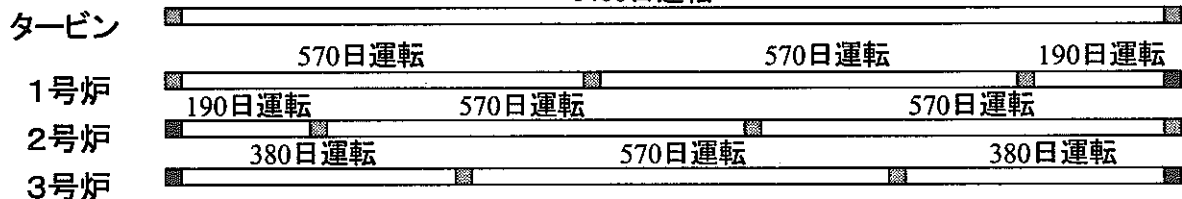
(4モジュールの場合)

1368日運転



(3モジュールの場合)

1408日運転



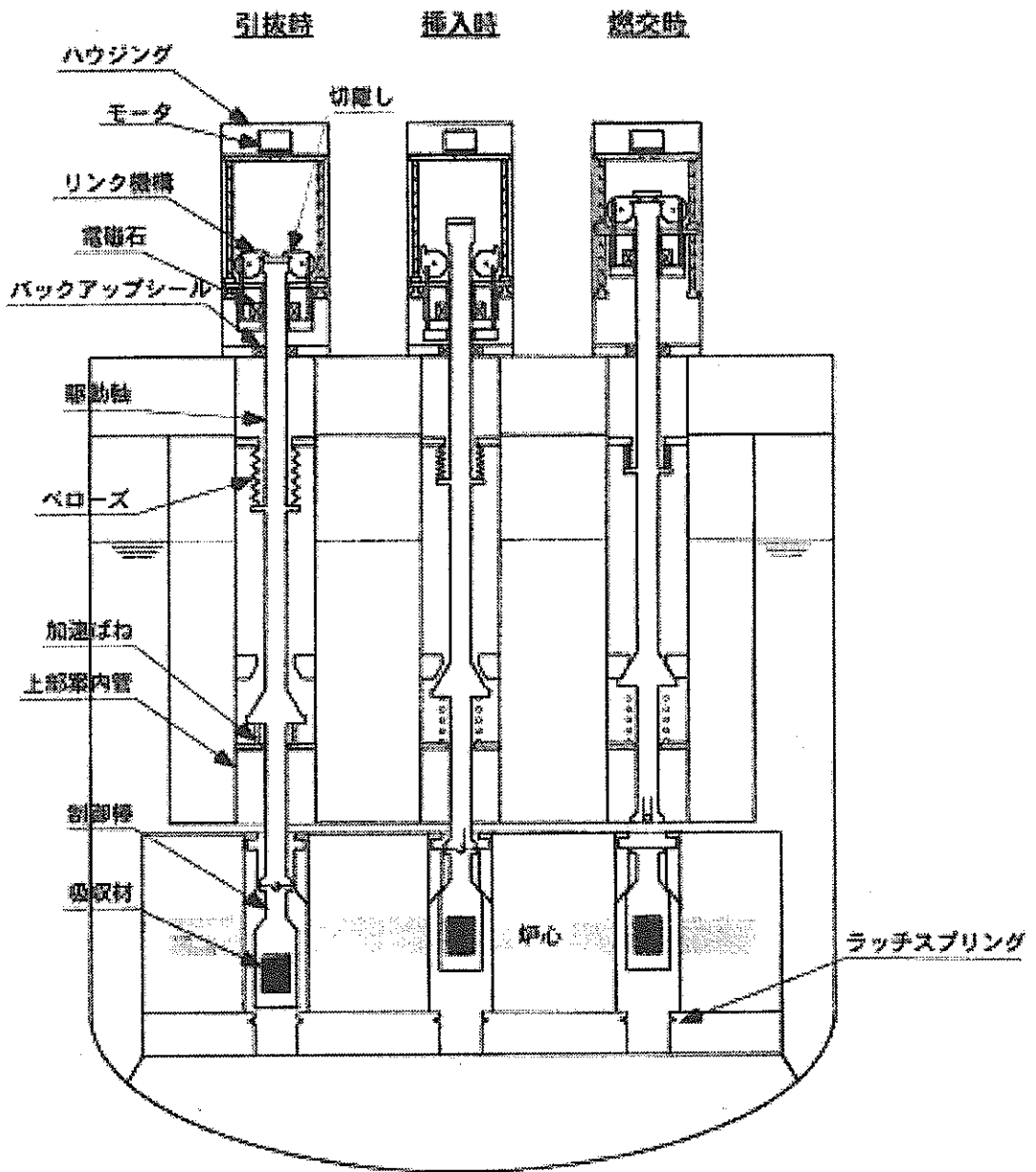


図-1 鉛-ビスマス炉の主炉停止系概念図

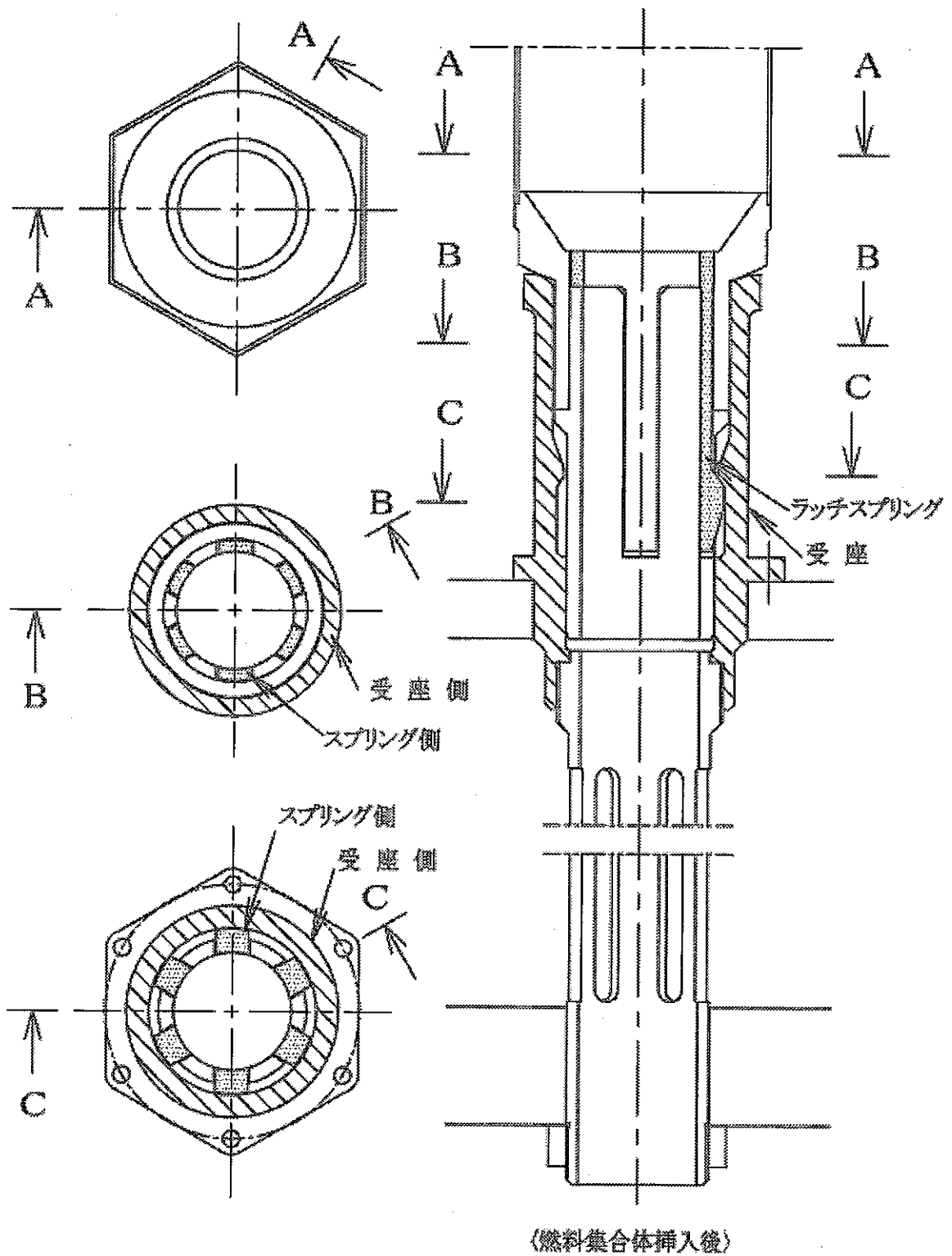


図 - 2 燃料集合体下部ラッチ機構概念図

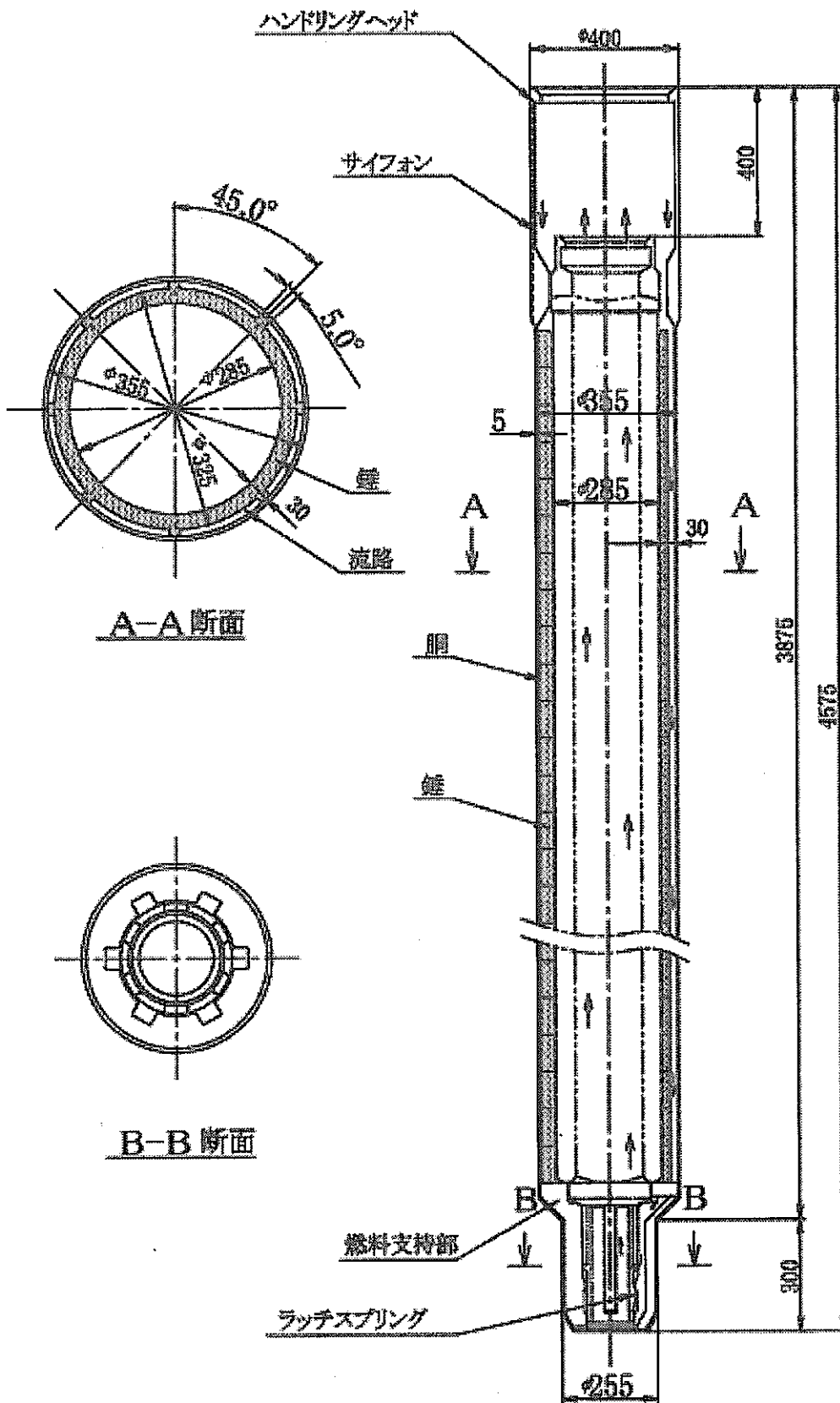


図 - 3 燃料移送ポット内の自然循環流路

### 3. まとめ

もんじゅ、軽水炉の実績、実証炉の設計等をベースにナトリウム冷却炉の運転保守コスト低減に向けて可能な方策を抽出し、これらの方策を実用化プラントの概念検討に適用すると共に、運転保守コスト低減のために必要な技術開発課題、開発計画を検討した。また、ナトリウム冷却炉の検討結果をベースとして鉛-ビスマス冷却炉、ガス炉について同様に検討した。主な成果は以下の通りである。

#### (1) 運転コスト低減方策の検討

##### (i) 所内比率低減方策の検討

実証炉の所内比率は 5.9%で、もんじゅの 10.9%に比べ約半分に合理化されているが、軽水炉の 4.2%に比べると多くなっている。実証炉の所内比率をみると系統圧損や除熱量で決まる熱輸送系及び補機冷却系の負荷で 4.3%に達しており、軽水炉並の 4.2%以下とすることは難しい。(但し、軽水炉に比べて熱効率が良い(軽水炉 35%程度に対してFBRは 41%程度)ので、所内比率を軽水炉並にしなければ、経済性で比肩できるようにならないわけではない。電気出力を増加させる効果としては、熱効率を 1%あげることと、所内比率を 2%強低減することとは等価である。)この熱輸送系の負荷の低減については、炉心の低圧損化等建設コスト低減に向けたプラント概念の検討の中で別途検討されている。尚、2次系削除概念とすれば約 1%所内比率を低減することができる。

熱輸送系および補機冷却系の負荷ならびに管理建物照明電源等の発電設備以外の負荷を除く実証炉の所内負荷は、所内比率で 1.2%であり、換気空調設備、燃料取扱設備、計装電源、予熱ヒータ設備の負荷が該当する。これら設備についてももんじゅの機能試験の評価結果を踏まえた負荷低減方策を抽出した。

##### (ii) ユーティリティの検討

運転コストに係わる主なユーティリティとしては、軽油、アルゴンガス、窒素ガスである。もんじゅでのこれらユーティリティ使用実績について調査した。この内、軽油については、もんじゅの場合補助ボイラーの使用量が多くなっているが、タービン抽気を活用すれば基本的に軽水炉並の使用量となる。アルゴンガス、窒素ガスの使用量については、プラント概念に依存するが、基本的にナトリウムのドレン・充填に伴うアルゴンガスの消費、アルゴン・窒素ガス雰囲気容積の縮小化による使用量の低減が有効である。

## (2) 保守コスト低減方策の検討

### (i) 定検工程短縮方策の検討

もんじゅの設備点検実績、もんじゅ及び実証炉の目標標準定検工程、軽水炉の実績定検工程を調査・分析し、定検短縮方策を検討した。

実証炉の目標標準定検工程である45日の妥当性について、もんじゅの設備点検実績、軽水炉の定検実績をベースに検討した。定検の各作業項目の内、FBR固有の作業項目については、もんじゅの設備点検実績をベースにして設計の違いを考慮して検討、軽水炉と同等な作業項目については最新の軽水炉の実績と比較検討を行い、概ね妥当なことを確認した。但し、FBR固有の作業項目については、定検として全体を工程管理した実績がないこと、もんじゅの設備点検実績、機能試験結果等をベースに合理化を見込んでいること等から、今後もんじゅで定検を積み重ね、改善を図りながら工程を合理化していくことが重要である。

上記検討を通して定検工程の支配因子(作業項目)を特定し、定検短縮の観点から設計に反映すべき事項を抽出した。

### (ii) 保守(補修)コストの低減

保守(補修)コストを低減させるためには、定検短縮と共にトラブルによる長期停止を回避することが重要である。1次系機器・構造等に万一のトラブルを想定した場合(もしくは健全性確認を行う必要が生じた場合)に、ナトリウムが不透明であるためナトリウムを抜き取らなければ状態確認が難しく、また系統への空気の侵入を防ぎながらの作業となるため復旧作業が難しいことである。この欠点を克服するためには、ナトリウム中目視検査装置・体積検査装置、及びナトリウム中インプレース補修装置の開発が必須であり、かつこれら装置の開発には長期間を要するため、早期に開発に着手することが望まれる。

また、トラブルの兆候を早期に検知することも重要であり、この観点から異常監視・診断システム、構造健全性モニタリングシステムの開発・高度化やSGの水漏洩検知設備の高度化等を進め、もんじゅに適用して技術として確立し実用化していく必要がある。

## (3) 実用化に向けた運転保守コスト低減方策の検討

上記で抽出した運転保守コスト低減方策をナトリウム冷却実用化プラントの概念検討に適用した。また、ナトリウム冷却炉の運転保守コスト低減方策をベースとして、鉛-ビスマス冷却炉、ガス炉についても検討を行った。

(i) ナトリウム冷却炉  
(大型炉)

ループ型炉については、天井クレーンの増設による並行作業化、放射能減衰待ち期間の短縮等により、40日程度の定検工程となった。

タンク型炉については、天井クレーンを増設しても主循環ポンプ点検と炉上部作業の並行作業化ができないため、45日程度の定検工程となった。

(中型モジュール炉)

中型モジュール炉（ループ型炉）において、1号炉の定検時にタービンを合わせて定検し、1号炉の運転中に2号炉、3号炉を順次定検するとした場合、3炉の平均稼働率は89.3%となり、大型炉の稼働率92.7%に比べてかなり低くなる。（1モジュールの定検工程は34日）

これは1号炉の定検時にタービンの定検をするため、2・3号炉が停止する必要がないのに停止するためである。そこでモジュール炉の稼働率を向上するため、

- 3モジュールをできるだけラップさせて定検し、タービン定検による他モジュールの不要な停止期間を短縮する
- タービンの定検インターバルを火力の蒸気タービン並の4年以内に長くしてタービン停止による不要な停止の影響を軽減する

という、2つの方策について検討した。

前者については、燃料取扱系が共用設備であるため燃料交換作業をシリーズに行う必要があることから、1・2・3号炉を7日遅れでラップ定検した場合が稼働率で最高の92.7%となった。

後者については、原子炉とタービンの定検インターバルを合わせる必要がないというモジュール炉の特性を活かした方策といえるが、稼働率は92.1%となった。前者の場合、SG伝熱管体積検査装置が3倍、その他の治工具、検査装置が2倍程度必要であり、かつそれに見合った要員の確保が必要となることを考えると、後者の方が稼働率では若干劣るが、優れる。また、後者の場合、原子炉モジュール側は5～6カ月間隔で順次定検を実施するので、タービンの信頼性を確認しながら定検インターバルを徐々に長くしていくことができることも長所となる。

また、モジュール炉の保守コストについて大型炉との差異について検討を行った。検討にあたっては、大型炉の原子炉側の定検・修繕工事費をタービン側のそれと同等と想定した。この場合、タービン側の工事費についてはモジュール炉と大型炉で差異はない。原子炉側については作業項目について両者に殆ど差がないので、工数が両者の定検日数に比例するもの（40日対34日×3モジュール）とする。この場合、大型炉の原子炉側工事費に対してモ



ジュール炉のそれは約 2.5 倍要することになる。タービン側も含めた全体としては、モジュール炉の工事費は大型炉のその約 1.75 倍 ( $50\% \times 2.5 + 50\% = 175\%$ ) 要すると推定される。

#### (ii) ガス冷却炉

炭酸ガス炉については、基本的に 1/4 区画ずつ定検する（例えば、ガス循環機の点検は 1 回 / 8 年となるが、AGR と同等）という前提で、45 日程度の定検工程となった。

ヘリウムガスタービン炉については、毎定検ガスタービン 1 基 / 4 基を予備機に交換する（即ち、1 回 / 6 年の交換頻度）という前提で 40 日程度の定検工程となった。電気事業法でガスタービンの点検は 2 年以内となっているが、本炉のヘリウムガスはクリーンであるため、6 年とできるものとした。

#### (iii) 鉛-ビスマス冷却中型モジュール炉

鉛-ビスマス炉については、ナトリウム冷却炉の定検工程をベースとして冷却材の違いによる定検実施上の問題点を摘出し、その解決方策を検討した上で、設備の違いを考慮して定検工程を検討した結果、39 日程度 / モジュールの定検工程となる見通しを得た。

### (4) 運転保守コスト低減のための課題と開発計画

FBR 実用化に向けた運転保守技術を確立するという観点からは、まず実機であるもんじゅが送電網に組み入れ、信頼できる発電設備として期待することができることを実証すること、即ち安全・安定な運転を達成することが第一である。更にこれを達成した上で運転保守経験を積み、改善しながら運転保守技術を確立・実証していくことが期待される。

特に、FBR 実用化に向けて軽水炉に比肩する発電コストを達成するためには、軽水炉並の定検工程が達成できることが必須であり、これを裏付け、実証していくことが重要である。このため、特に FBR 固有の定検作業項目について定検として工程管理した実績がないこと、実用化に向けた定検工程の検討にあたってもんじゅの設備点検実績、機能試験結果等を基に合理化を見込んでいること等から、今後もんじゅで定検実績を積みながら改善を図り、定検工程を合理化・短縮化していくことが期待される。

運転保守コスト低減の観点から、フェーズ 2 より開発すべき要素技術として以下を抽出した。

#### (a) 高温用 SG 伝熱管体積検査技術の開発

- (b) ナトリウム中目視検査技術の開発
- (c) 高燃焼度燃料の開発
- (d) 長寿命制御棒の開発
- (e) 異常監視・診断技術、構造健全性モニタリング技術等の予防保全技術の高度化（基礎・基盤技術として継続実施）

尚、鉛-ビスマス炉固有の課題として、燃料交換機、燃料集合体等の鉛-ビスマスの洗浄方法、洗浄時のポロニウムの挙動、除去技術の開発が必要であり、概念設計開始までに開発して置くことが望ましい。

#### 4. おわりに

FBRの経済性目標である将来の軽水炉に比肩できる経済性を達成するためには、炉の建設コスト、燃料サイクルコストと共に、運転保守コストの低減を図っていく必要がある。この観点から実用化戦略調査研究の一環としてももんじゅや軽水炉等のプラント運転保守経験および実証炉の設計をベースに、FBR実用化候補概念の運転保守コスト低減に向けた検討を行った。

運転保守コスト低減上特に重要な定検期間短縮方策を中心に、所内比率および保守・補修コストの低減策も検討を行った。もんじゅの設備点検実績や軽水炉の定検実績等を踏まえて、定検短縮の観点から設計に配慮すべき方策を抽出し、抽出した方策をナトリウム冷却炉の実用化候補概念に適用して定検工程を検討した。また、ガス冷却炉および鉛-ビスマス冷却炉の実用化候補概念について、ナトリウム冷却炉の定検工程をベースに設備の違いを考慮して定検工程を検討した。これら検討の結果、いずれも40～45日程度の軽水炉並の定検期間を達成できるポテンシャルがあることが分かった。

今後、この軽水炉並の定検期間が達成できることをもんじゅで運転保守実績を積みながら、裏付け、実証していくことが重要である。特に、上記定検工程の検討にあたっては、もんじゅの設備点検実績や機能試験結果を基に将来の合理化を見込んでいること、主要な作業項目を対象としており定検全体として細部の取り合いまで検討できていないこと、ナトリウムドレンを不要とできる検査技術等新技術が開発できることを前提としていること等から、もんじゅで定検実績を積みながら新技術の適用も含めて改善・合理化を進め、定検工程を合理化・短縮化できることを実証していくことが望まれる。

## 5. 参考文献

- 1)新部信昭,島川佳郎,他：ナトリウム冷却炉の検討,JNC TN9400 2000-074(2000.6)
- 2)三原隆嗣,江沼康弘,他：重金属冷却炉の検討, JNC TN9400 2000-079 (2000.7)
- 3)小林順,木曾芳広,他：ガス冷却炉の検討, JNC TN9400 2000- 073(2000.6)