

FBR サイクル総合研修施設の研修結果報告  
(ナトリウム研修及び保守研修)

—平成 12 年度—

(技術報告)

2001 年 6 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ください。

〒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 Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184  
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

FBR サイクル総合研修施設の研修結果報告（ナトリウム研修及び保守研修）  
 －平成 12 年度－  
 (技術報告)

澤田 誠\*<sup>1</sup>、渡辺 智夫\*<sup>1</sup>、岩瀬 隆司\*<sup>2</sup>  
 永井文夫\*<sup>3</sup>、榎原 安英\*<sup>1</sup>

## 要 旨

平成 12 年 10 月より敦賀本部国際技術センター（白木地区）に建設された「FBR サイクル総合研修施設」の本格的な運用が開始された。同研修施設は、高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の運転再開に向けて運転員や保守員の教育研修はもとより、新型転換炉「ふげん」やサイクル機構他事業所の技術者の研修、更には地元の研修施設としての活用など、幅広い活用を目指した研修施設で、地域を含めたグローバル研修施設としての教育活動を開始した。

研修施設は、「ナトリウム学校」と呼ばれるナトリウム研修施設と「保守学校」と呼ばれる保守研修施設から構成されている。ナトリウム学校ではナトリウムの化学的及び物理的性質の学習や、ナトリウムループ系の基本的運転技術の習得、ナトリウム消火訓練、更にはナトリウム漏洩時の対処訓練など幅広い分野に亘るナトリウム取扱技術の研修を実施している。一方、保守学校では 9 種類の保守学習モデルを設備し、「もんじゅ」特有のナトリウム機器や設備の点検技術、並びにポンプ分解点検や電源盤点検、計測制御技術などの汎用技術について技術の習熟を図っている。

研修開始初年度に当たる平成 12 年度においては、半年間に 6 種類のナトリウム研修を 22 回、また 8 種類の保守研修を 11 回、計 33 回の研修を実施した。総受講者数は 305 名で、この内 75 名は地元の敦賀美方消防組合と敦賀工業高校からの受講であった。

研修に当たっては、やりっぱなしの研修で終わらないようにするために、受講者自身で研修成果を定量的に把握できる「研修成果評価手法」を新規に考案・導入した。これは、より有意義な研修の遂行を目指したもので、チャレンジクイズなる技能確認試験を研修前後に実施し、研修の成果を受講者自身が点数評価できるシステムである。これまでの結果では、凡そ 40 点～50 点台であった研修前の平均点は研修後には凡そ 80 点台に大幅にアップしており、研修を通して受講生の知識・知見が飛躍的に向上していることが伺える。

平成 13 年度においては、更に「ナトリウム配管漏洩対応訓練コース」や「保守一般コース」の新設など更なる研修の充実を目指しており、「もんじゅ」の運転再開に向けて運転員、保守員の育成を着実に進めるとともに、地元技術者の教育研修にもさらにその門戸を広げて貢献していく所存である。

\*1：国際技術センター 実技訓練グループ

\*2：(現) 日立製作所日立工場

\*3：派遣 (高速炉サービス㈱)

## Training Report of the FBR Cycle Comprehensive Training Facility in 2000

Makoto Sawada<sup>\*1</sup>, Tomoo Watanabe<sup>\*1</sup>, Ryouji Iwasw<sup>\*2</sup>,  
Humio Nagai<sup>\*3</sup>, Yasuhide Sakakibara<sup>\*1</sup>

### Abstract

The FBR Cycle Comprehensive Training Facility constructed in the International Cooperation and Technology Development Center (in Shiraki area) was opened in earnest since October in 2000. The facility is mainly with the aim of encouraging in technical skills of the operators and maintenance engineers in the prototype fast breeder reactor Monju and also is offered to another center in JNC and the local community as a global training facility. Its facility consists of the called sodium school and maintenance school. It is able to study widely sodium huddling technologies, such as chemical and physical properties of sodium, sodium loop operating skill, sodium fire extinguish and treatment sodium compound, and counter training for sodium piping leakage at the sodium school. While the nine study models are installed in the maintenance school and the trainees can learn not only related Monju inherent maintenance technology but also some general maintenance skills.

During for six months, October 2000 to March 2001, the six sodium training courses were held 22 times and the eight maintenance courses were carried out 11 times. Total participated number is 305 and 75 trainees among of them joined from the community. To do the training effectively, as the evaluation and analysis system of training result, the skill confirmation test of which aims to have a grasp training results quantitatively by themselves was devised and was introduced. Almost of the training course's results were improved remarkably such as that average point after getting training were risen level of 80 point from level of 40 point before training.

Like this, it is obvious that their skills of the Monju operators and maintenance engineers are advancing toward to Monju restarting.

---

\*1: Operating and Maintenance Group in I.C.T.D.C

\*2: Hitachi Factory in Hitachi Co.Li. (Now)

\*3: Dispatch from Fast Technology Engineering Co.

## 目 次

1. 緒 言	1
2. FBR サイクル総合研修施設の概要	2
2.1 ナトリウム学校（ナトリウム研修棟）	2
2.1.1 ナトリウムループ設備	2
2.1.2 ナトリウム取扱消火訓練設備	5
2.1.3 ナトリウム基礎実験設備	7
2.1.4 ナトリウム洗浄処理設備及び廃液処理設備	8
2.2 保守学校（保守研修棟）	9
2.2.1 二次主循環ポンプ軸封部学習モデル	9
2.2.2 制御棒駆動機構学習モデル	9
2.2.3 燃料取扱設備動作学習モデル	9
2.2.4 炉上部燃料交換装置据付学習モデル	9
2.2.5 電源盤点検学習モデル	10
2.2.6 計測制御学習モデル	10
2.2.7 水系ループ運転保守学習モデル	10
2.2.8 圧力開放板交換学習モデル	10
2.2.9 非破壊検査技術学習モデル	11
2.2.10 その他	11
3. 研修カリキュラムと研修テキストの策定・整備	17
3.1 研修カリキュラムの策定	17
3.2 研修テキストの作成・整備	17
4. 研修成果評価手法の考案・導入	20
5. 平成 12 年度における研修実績	20
6. 研修成果の分析・評価	24
6.1 ナトリウム研修	24
6.1.1 ナトリウム入門コース	24
6.1.2 ナトリウム基礎実験一般コース	25
6.1.3 ナトリウム基礎実験専門コース	26
6.1.4 ナトリウム消火訓練コース	27
6.1.5 ナトリウムループ供給系運転コース	28
6.1.6 ナトリウムループ純化系運転コース	30
6.2 保守研修	31
6.2.1 制御棒駆動機構コース	31
6.2.2 燃料取扱及び貯蔵設備コース	31
	32
7. 結 言	34
8. 謝 辞	34
9. 参考文献	34
10. 付 錄	35

## 写真・図リスト

写真-1 : FBR サイクル総合研修施設の外観	2
写真-2 : ナトリウム消火訓練セルの外観	6
写真-3 : ナトリウム基礎実験装置の外観	7
写真-4 : 小規模燃焼セルの外観	8
写真-5 : 二次主循環ポンプ軸封部学習モデル	12
写真-6 : 制御棒駆動機構学習モデル	12
写真-7 : 燃料取扱動作学習モデル	13
写真-8 : 炉上部燃料交換装置据付学習モデル	13
写真-9 : 電源盤点検学習モデル	14
写真-10 : 計測制御学習モデル	14
写真-11 : 水系ループ運転保守学習モデル	15
写真-12 : 圧力開放板交換学習モデル	15
写真-13 : ナトリウム機器カットモデル（1次主循環ポンプ下部）	16
図-1 : ナトリウムループ設備系統図(3)	3

## 表リスト

表-1：ナトリウムループの主要機器仕様	5
表-2：ナトリウム取扱消火訓練設備／主要設備・装置の仕様	6
表-3：研修カリキュラム	18
表-4：平成12年度研修実績工程表	21
表-5：平成12年度研修受講者数実績	23

## 1. 緒 言

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」を対岸に望む福井県敦賀市白木地区の一角に、通称「ナトリウム学校」と「保守学校」と呼ばれる「FBR サイクル総合研修施設」がある。

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」は、我が国初の高速増殖炉の発電炉として平成 6 年 4 月に初臨界を達成したものの、性能試験中の平成 7 年 12 月にナトリウム漏洩事故を起こし、現在原子炉は停止状態にある。サイクル機構は、この事故から様々な多くの教訓を学んだが、その一つとしてナトリウム取扱技術と保守技術の一層の充実強化を図ることが急務との認識に立ち、平成 11 年 7 月に「ナトリウム学校」と「保守学校」から成る FBR サイクル総合研修の建設に着手し、翌年 3 月に施設を完成させた。(写真-1 参照)

ナトリウム学校では、高速炉特有の技術研修としてナトリウム消火訓練はもとより、観察や測定実験を通してナトリウムの化学的性質や物理的性質を学習する一方、ナトリウム・ループの運転技術の習熟など幅広い分野に亘ってのナトリウム取扱技術の習得を目指して研修を実施している。更に平成 13 年度からはナトリウム漏洩時の対処訓練の実施も計画中である。

一方、保守学校では「もんじゅ」特有のナトリウム機器や設備の点検技術は勿論のこと、ポンプ分解点検や電源盤点検、計測制御技術などの汎用技術についても技術の習熟を図っている。

FBR サイクル総合研修施設は、平成 12 年 9 月より本格的な運用が開始され、「もんじゅ」や「ふげん」、地元などを対象に平成 13 年 3 月末現在までに「ナトリウム学校」で 6 種類の研修コースを計 22 回、「保守学校」では 8 種類を計 11 回開催した。延べ受講者数は 305 名で、そのうち 75 名が地元からの受講者である。

研修に当たっては、やりっぱなしの研修とならないよう「研修成果評価手法」を新たに考案・導入し、より充実した研修となるように努めた。これは、技能確認試験に当たる「チャレンジクイズ」を研修前と研修後に実施し、研修の成果を点数で表すことによって習得できた点、未だ完全に習得できていない点を自らが定量的に把握し、研修の成果を自らが評価するという方法である。この点数データは、講義の仕方、内容等、研修主催者側にとってもアンケート調査と同様貴重な反省材料であり、これらの教訓材料は適宜次の研修に反映させるなど常に改善改良の姿勢で研修に取組んでいる。

また、「もんじゅ」の広報活動の一環として本研修施設の傍らには MC スクエアーと呼ばれる「もんじゅ」PR 館が設けられ「もんじゅ」広報活動を展開しているが、本研修施設はその活動の一旦を担い、ナトリウム燃焼の様子や実物大ナトリウム機器の切断面構造を紹介するなど「もんじゅ」の理解促進活動に貢献している。開校以降、半年の間に 2300 名を超える見学者が施設を訪れたが、この数値は社会の方々が「もんじゅ」に深い関心を寄せていくことを示すものである。

この他、研修施設はサイクル機構関連の研修ばかりでなく地元消防組合のナトリウム消火訓練や地元工業高校の実習教育にも活用されるなど、地域社会も含めたグローバルな総合研修施設として今後とも益々その利用価値を高めて行くものと期待される。



【写真-1 FBR サイクル総合研修施設の外観】

## 2. FBR サイクル総合研修施設の概要

### 2.1 ナトリウム学校（ナトリウム研修棟）

本施設は、ナトリウムループの運転技術を学ぶための「ナトリウムループ設備」とナトリウム消火訓練などを行う「ナトリウム取扱消火訓練設備」、並びにナトリウムに関する化学的性質や物理的性質の学習やナトリウム燃焼の様子を観察できる「ナトリウム基礎実験設備」並びにナトリウム化合物の処理を行うための「ナトリウム洗浄処理設備」から構成されている。

#### 2.1.1 ナトリウムループ設備

本研修施設のナトリウムループ設備は炉心や中間熱交換器等、熱の授受に関する機能は模擬していない。本設備は、次の三点に係る運転技術の習熟を目的としている。

- ①ナトリウムループの基本的操作（充填操作、ドレン操作）
- ②ナトリウム機器の運転特性（ナトリウム電磁ポンプ、ナトリウム液面計）
- ③ナトリウム純度管理技術（純化系設備の運転要領、純度管理測定要領）

また、本ループは特に次の点に留意して設計を行った。

- (i) 実機プラントで生じる現象を可能な限り臨場感をもって体験できること。
- (ii) 研修の性質上、誤操作の可能性が大きいことからインターロック等による機器保護を図ること。
- (iii) ナトリウム漏えい等に対する安全対策を講じること。

以上の目的と設計上の留意事項を踏まえながら「ナトリウム充填ドレン系」「ナトリウム供給系」及び「ナトリウム純化系」の三つの系統から構成されるナトリウムループ設備を設備した。図-1にループの系統構成図を、また主要機器仕様を表-1に示す。

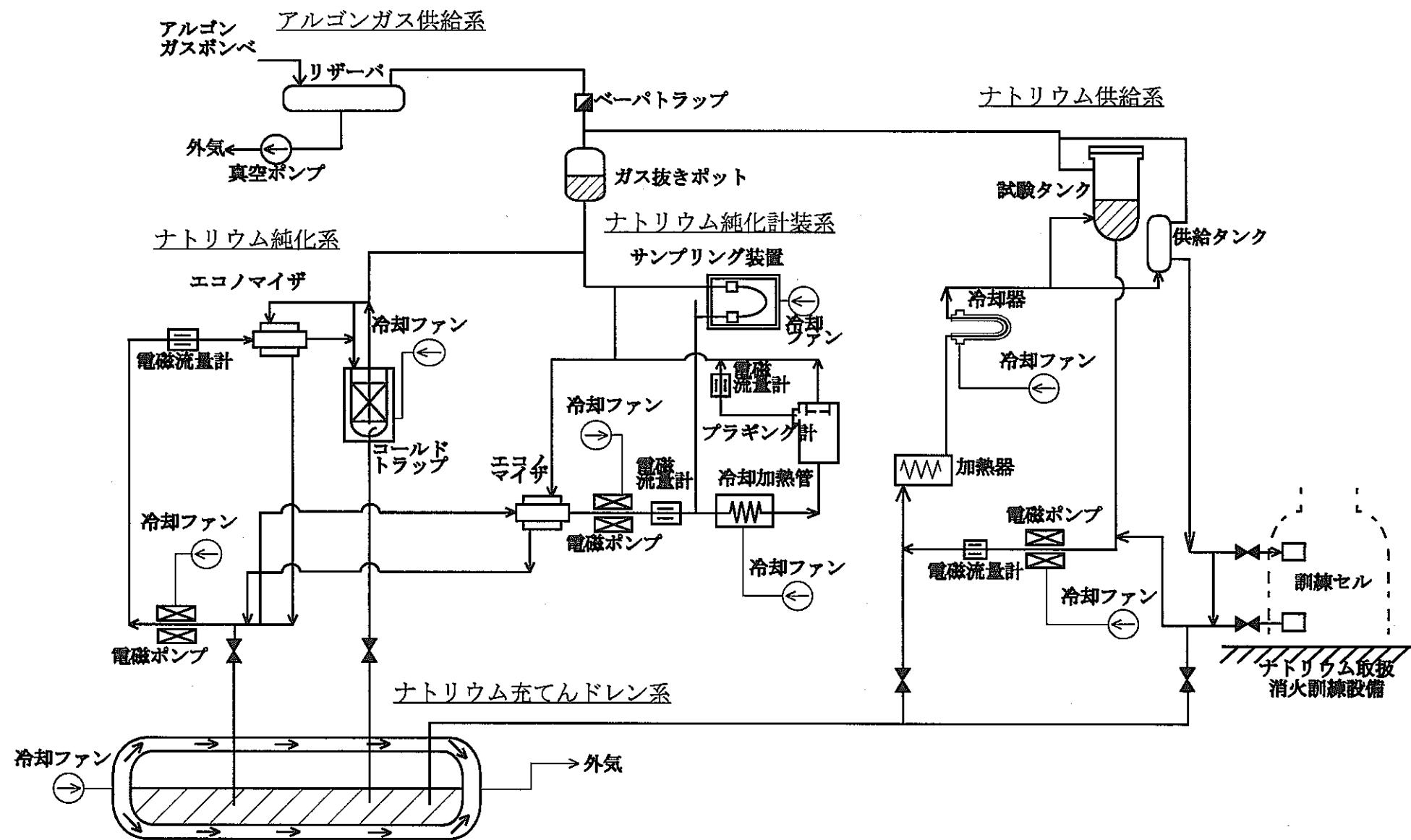


図-1 ナトリウムループ設備系統図

#### ①ナトリウム充填ドレン系

本系統は、ダンプタンクと呼ばれる貯蔵タンクとタンク強制冷却用の冷却ファン、並びにナトリウムを循環するための電磁ポンプを有する。ナトリウムは、普段ダンプタンク内に固化状態で保存されており、ループ運転時に電気ヒータで溶かして液体状にしてからループ中に充填される。運転終了後、ナトリウムは速やかに同タンクへドレンされ、冷却ファンによって短時間で固化される。タンクの設計容積は  $1.3\text{m}^3$  であるが、実際上のナトリウム取扱量はおよそ  $1\text{ m}^3$  である。また、系統の設計温度は  $500^\circ\text{C}$  である。

#### ②ナトリウム供給系

本供給系には、充填ドレン系と共有である電磁ポンプの他、試験タンク、供給タンク、加熱器、冷却器等が含まれる。本系統では、系統温度を変化させて電磁ポンプの温度依存特性を測定したり、試験タンクの液位を変化させてナトリウム液面計の特性を測定する他、機能的には次項の「模擬ナトリウム配管漏洩訓練」にも活用できるように設備設計されている。供給系の設計温度は  $550^\circ\text{C}$ 、循環流量は  $20\text{ l/min}$  である他、加熱器と冷却器により系内ナトリウム温度は  $200^\circ\text{C} \sim 530^\circ\text{C}$  の範囲で短時間に調整制御できる。また、試験タンクにはタンク内のナトリウム液面が観察できるようカバーガス部に耐熱ガラスの観察窓が設置してある。

#### ③ナトリウム純化系

ナトリウム中に含まれる酸素や水素などの不純物はナトリウム機器や配管などの腐食を促進させるため、FBR プラントの運転管理においては、ナトリウムの純度管理は非常に重要な課題である。ナトリウム中の酸素や水素の不純物は、ナトリウム温度を低下させれば流路上に析出結晶化するが、この特性を利用したものがコールドトラップと呼ばれるナトリウム不純物捕獲装置であり、本系統には  $0.25\text{m}^3$  の容積を有するコールドトラップが設備されている。

また、不純物を測定する装置をプラギング計と称するが、この装置は不純物の溶解度が温度に依存する原理を利用した測定装置であり純化系には必ずコールドトラップとともに設備される。「もんじゅ」プラントではナトリウム中の酸素濃度は  $10\text{ppm}$  以下、水素濃度は  $170\text{ppb}$  以下という低濃度で運転・維持される。

この他、本純化系にはサンプリング設備（系統と脱着可能なサンプリング管）が設けられ、サンプリング管取付・取外作業を体験研修できる他、適宜系統内のナトリウムを実際にサンプリング分析できるように設計されている。

#### ④その他設備

充填ドレン系、供給系、純化系の共有設備として Ar ガス系設備やヒータ設備、制御盤設備などが設備されている。また、ナトリウム配管区域にはコンクリートと漏洩ナトリウムが直接接しないようにするためのナトリウム漏洩対策が講じられている他、漏洩をいち早く検出するための 2 種類の漏洩検出器が各部に備えられ、万一警報が発生した場合、系統内のナトリウムは 5 分程度の短時間でダンプタンク内へ自動ドレンされる。

表-1 ナトリウムループの主要機器仕様

機器名	主要目
ダンプタンク	形式：横置円筒形 幾何容積：1.3m <sup>3</sup>
コールドトラップ	形式：縦置円筒形(空気冷却メッシュ充填型) 内容積：0.25m <sup>3</sup>
プラギング計	形式：オリフィス析出型 測定範囲：120°C～200°C(プラグ温度)
サンプリング装置	形式：貫流型 サンプリングナトリウム量：40cm <sup>3</sup>
試験タンク	形式：縦置円筒形 幾何容積：0.62m <sup>3</sup> 許容ナトリウム量：0.3m <sup>3</sup>
供給タンク	形式：縦置円筒形 幾何容積：0.03m <sup>3</sup> 許容ナトリウム量：0.025m <sup>3</sup>
ガス抜きポット	形式：縦置円筒形 幾何容積：0.025m <sup>3</sup> 許容ナトリウム量：0.022m <sup>3</sup>
加熱器	形式：横置円筒形(ヒータ加熱型) 内容積：0.016m <sup>3</sup> 昇温速度：150°C/h
冷却器	形式：フィンチューブ型二重管空冷式 降温速度：150°C/h

## 2.1.2 ナトリウム取扱消火訓練設備

本設備では次の二点の研修訓練を行う。設備仕様を表-2に示す。

### ①ナトリウム消火訓練

本設備には、ナトリウム訓練セル（写真-2 参照）と呼ばれる耐熱ガラスで区画されたセルが設けられ、そのセル内でナトリウム消火訓練が行われる。ナトリウム消火訓練は、電気ヒータを備えたステンレス製皿上で固体ナトリウムを加熱燃焼（最大 5kg）させ、炎や煙の発生状況の観察やナトリウム消火器（炭酸ナトリウムを主剤）を用いたナトリウム火災の消火作業を実習体験する。

### ②模擬ナトリウム配管漏洩訓練

本訓練では、訓練セル内で配管からのナトリウム漏洩を実際に模擬し、配管からのナトリウム漏洩状況や配管へのナトリウム化合物の付着状況の観察、並びにナトリウム化合物の処理を体験学習できる。これは、約 7m 上にあるナトリウムループ供給系の供給タンクから、予め漏洩するように製作された模擬配管にナトリウムを供給することによりナトリウム漏洩を発生させるものであり、研修としては初めての試みである。なお、訓練セル内で発生した劇物の酸化ナトリウムや水酸化ナトリウムなどを含むナトリウム煙（エアロゾルと称される）はスクラッパーや高性能フィルター等設備した排気設備にて排気処理し、環境に直接放出しないよう設計している。

また、訓練セルの内面ガラスにエアロゾルが付着するのを防ぐため、エアカーテンが形成されるように給気設備が工夫されている。

表-2 ナトリウム取扱消火訓練設備／主要設備・装置の仕様

設備・装置名	主要目
訓練セル	形状：外径 8m、高さ 6m、16 角柱 床ピット部：ステンレスライニング構造 運転圧力：400±600 Pa 給排気流量：約 70 Nm <sup>3</sup> /min
ナトリウム燃焼皿	形状：直径 80cm/深さ 25cm の鏡板形状 燃焼ナトリウム量：5kg 以下 設計温度：1000°C 付属品：電気ヒータ、保温材、蓋、架台
模擬ナトリウム 漏洩配管	形状：実機 2B 配管と同様 漏洩ナトリウム量：5kg 以下 付属品：ガスサンプリング型漏洩検出器 ヒータ、保温材、キャッチパン



【写真-2 ナトリウム消火訓練セルの外観】

### 2.1.3 ナトリウム基礎実験設備

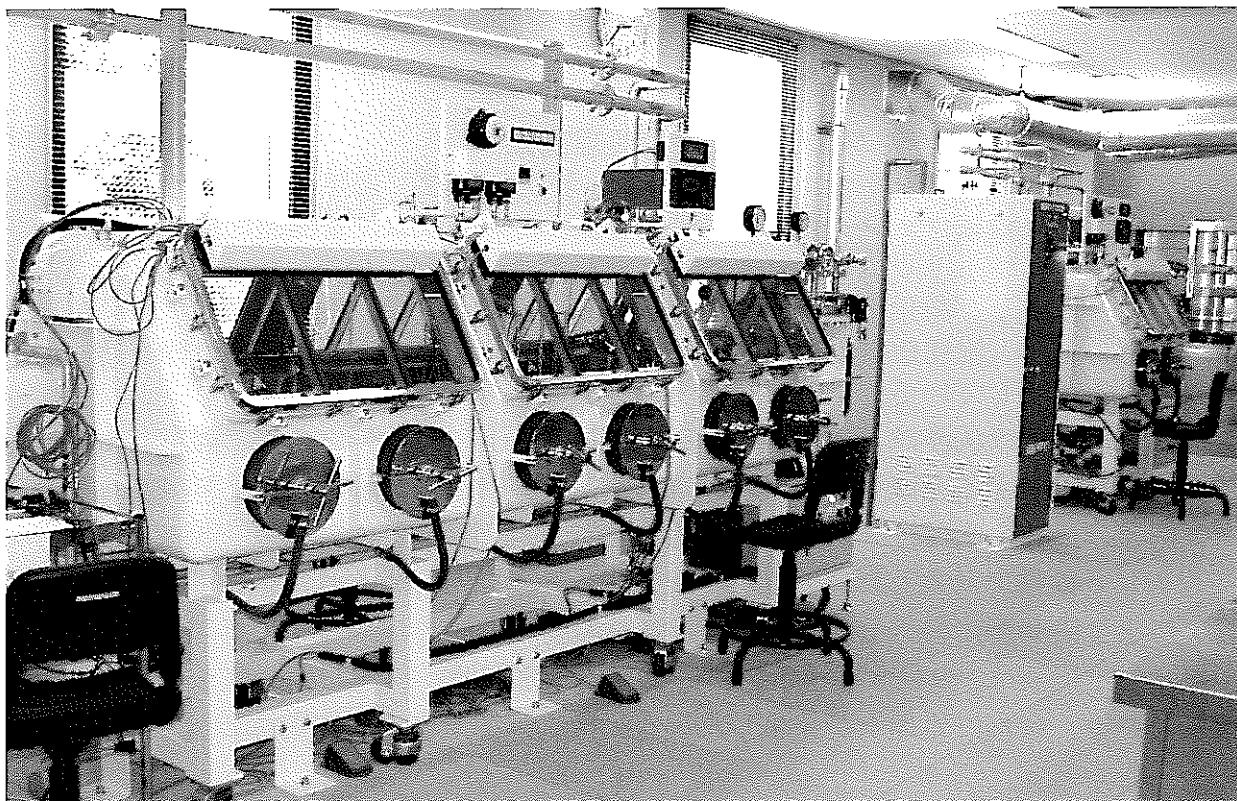
本実験設備は次の二つの装置から構成されている。

#### ①基礎実験装置

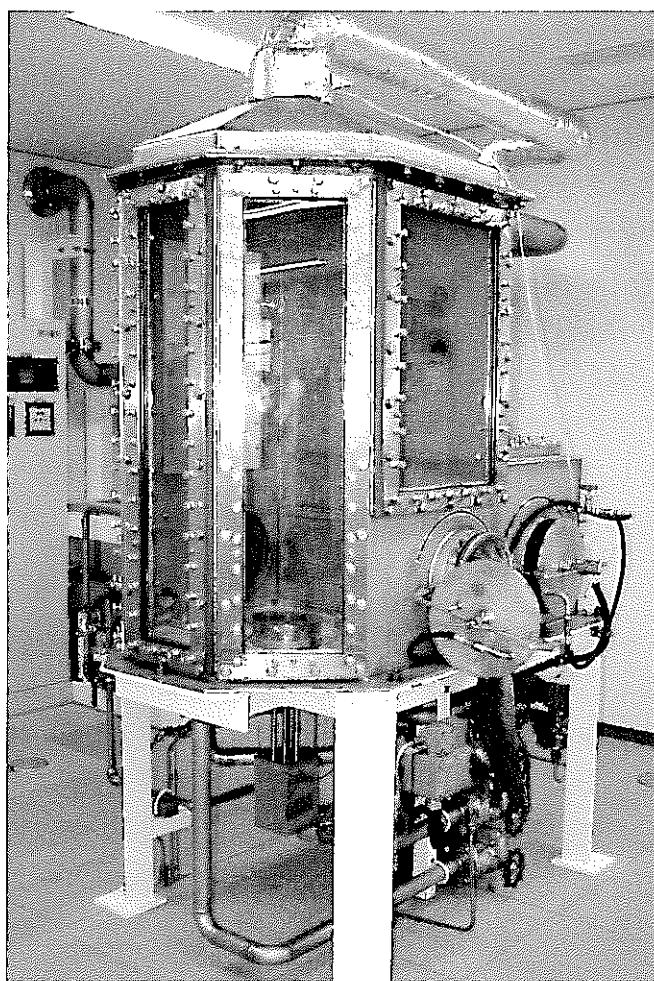
本装置は、ナトリウムの基礎的知識として種々のナトリウムの物理的特性を実際に測定しながら学ぶための装置であり、特にプラントの運転において関係の深い融点、比熱、熱伝導率、密度、粘性及び表面張力について測定が可能である。測定は、ナトリウムが化学的に非常に活性な物質であることから不活性ガス中で行う必要があるので、アルゴンガスで満たしたグローブボックスと呼ばれる気密ボックスの中で行われる。グローブボックス内の酸素や水分は、アルゴンガス精製装置により除去されボックス内の酸化を防止している。また、グローブボックスには強化ガラスが施され、ボックス内の様子を見ながら測定器具を取り扱うことができる。(写真-3 参照)

#### ②小規模燃焼セル

小規模燃焼セルは、耐熱ガラス越しにナトリウム燃焼の様子を観察できる装置でナトリウムの化学的性質を学習するためのものであるとともに、ナトリウムに関する PA 装置としても大いに活用している。ナトリウムを正しく理解して頂く理解促進活動としては、実際にナトリウムに触れたりナトリウムが燃える様子を直に見て頂くことが最善の策である。この考えに従って、ここでは固体ナトリウムを切断したり、小規模燃焼セル内で少量(5g程度)のナトリウムを溶かして燃焼させたりするなどの理解促進活動を展開している。(写真-4 参照)



【写真-3 ナトリウム基礎実験装置の外観】



【写真-4 小規模燃焼セルの外観】

#### 2.1.4 ナトリウム洗浄処理設備及び廃液処理設備

ナトリウム洗浄処理設備は、洗浄タンク、蒸気ボイラ、過熱装置、気水分離タンク、水循環ポンプ、給気ファン、洗浄室で構成され、ナトリウム付着機器の洗浄に関する訓練に用いるほか、ナトリウムに触れた機器、機材等を再利用、保修、廃棄するのに先立ち、付着ナトリウム及び酸化ナトリウムを除去するために用いる。洗浄工程は、水蒸気と窒素ガスの混合気体（湿潤窒素ガス）の吹付け洗浄の後、必要により水浸漬洗浄を行い、送風乾燥する方式としている。

混合気体吹付け洗浄は、洗浄工程の自動運転が可能な洗浄タンク内で固定した吹付けノズルにより実施する方式と、ステンレス鋼板で簡易的に組まれ、強制排気機能を有した洗浄室内で、手持ち吹付けノズルにより実施する方式のいずれかにより実施できる。

なお、各設備で発生した廃液は、廃液受槽にいったん貯められた後、適宜、廃液移送ポンプにより中和槽に移送し、塩酸槽から5%濃度の塩酸を注入し中和処理する。中和処理が終了した廃液は、中和水移送ポンプにより処理水貯槽へ移送し、pH値を監視しながら貯留している。余剰に処理水が発生した場合には、外部産廃業者に最終処分を依頼する。

## 2.2 保守学校

本施設内には9種類の保守訓練用学習モデルと数種類のナトリウム機器カットモデルが用意されている。訓練装置は、「もんじゅ」の特有設備を習熟するための5種類の学習モデルと汎用技術に関する4種類のモデルから構成されている。「もんじゅ」特有設備に関する装置については、なるべく実機に近い作業環境で臨場感を持った作業を達成できるよう工夫されている。

### 2.2.1 二次主循環ポンプ軸封部学習モデル

FBRで用いられる機械式ナトリウムポンプの軸封装置には、メカニカルシールが用いられているが、メカニカルシールは優れたシール性を有する反面、構造が複雑でその保守取扱いには熟練を要する。本装置は「もんじゅ」の二次主冷却系循環ポンプの軸封部周辺を実寸大で模擬しており、ポンプ本体へのメカニカルシールの取付・取外作業や芯出し調整作業など、メカニカルシール本体の分解点検作業を実機と同じ作業環境で訓練することができる。(写真-5 参照)

### 2.2.2 制御棒駆動機構学習モデル

制御棒駆動機構(CRD)は、原子炉の出力を調整したり原子炉を緊急に停止させる機能を有する非常に重要な装置である。「もんじゅ」には、その機能・用途に応じて「微調整棒駆動機構」「粗調整棒駆動機構」と「後備炉停止棒駆動機構」の3種類のCRDが設備されているが、一つの故障要因で全てのCRDの機能が喪失するような事態を避けるために、それぞれのCRDの構造は独立したものとなっている。これを多重仕様設計というが、CRDの保守点検に当たっては、これら各CRDの構造の違いを熟知していかなければならない。本装置では、各々のCRDの内部構造を精密に模擬しているばかりでなく、実際にCRDの挿入や引抜、掴み・離し及びスクラム(急速挿入)の各動作を忠実にデモンストレーションすることができ、研修生は直にそれを観察学習することができる。また、一般見学者向け用として、音声によるガイド機能も備えられている。(写真-6 参照)

### 2.2.3 燃料取扱動作学習モデル

本装置は、「もんじゅ」の全ての燃料取扱及び貯蔵設備を実機の1/12スケールで模擬した学習用モデルであり、新燃料の受入れから使用済燃料の搬出に至るまでの一連の燃料取扱と貯蔵作業の流れとともに、主要機器の燃料取扱動作を学習することができる。

ここで、燃料交換設備、燃料出入設備、炉外燃料貯蔵設備などの主要機器には実機同様に燃料、燃料移送ポット及び缶詰缶を移送する機能を持たせており、通常見ることのできない機器内部における燃料取扱状態を容易に理解できるようにするために、機器の一部を切り欠き、内部構造が見えるように工夫されている。また、CRDモデルと同様に一般見学者向け用の音声ガイド機能も設けられている。(写真-7 参照)

### 2.2.4 炉上部燃料交換装置据付学習モデル

本装置は、燃料交換作業前に行う準備作業及び交換作業終了後の復元作業の実技訓練を行うことを目的とした学習モデルであり、縦横4m、深さ4.5mのピット内に、炉心上部機構、回転プラグ及び燃料交換機孔ドアバルブなど炉心上部に設備されている各機器を実寸大で模擬した模擬体を配置し、「もんじゅ」の炉心上部における狭隘な作業環境を再現

している。

本装置の学習ポイントは、狭い区域内での重量物の芯出しなどの取扱を如何に安全に迅速且つ精度良く行うかを習得するかという点であり、この技術は燃料交換作業ばかりではなく、他の重量物取扱作業にも応用のきく技術である。また、本装置のうち燃料交換孔ドアバルブなど定期的なメンテナンスが必要とされる機器については、本設備を用いて分解点検作業の訓練を行うことができるよう外観だけでなく内部構造も模擬している。(写真-8)

## 2.2.5 電源盤点検学習モデル

本装置は、汎用技術の一つである電源盤の分解点検に関する学習モデルであるが、モデル的には「もんじゅ」で使用しているメタクラ、パワーセンター及びコントロールセンターをそれぞれ1面ずつ模擬し、なるべく「もんじゅ」の電源盤点検に近い環境を整えている。研修では、遮断器や保護継電器の構造や動作原理などの原理を学ぶとともに、遮断器の取外・取付や保護継電器の試験を実際に行うなどの点検作業を実体験する。

なお、盤の側面は透明なアクリルパネルを使用し、通常は見ることのできない電源盤の内部構造を容易に観察学習できるよう工夫している。(写真-9)

## 2.2.6 計測制御学習モデル

代表的な計測制御要素として温度、圧力、流量、液位が挙げられるが、本装置はこれらパラメータを対象にして最も一般的な制御方法であるPID(比例・積分・微分)制御を学習するためのものである。装置には、温度、圧力、流量及び液位毎に独立した4つのミニ制御ループがあり、各ループにはそれぞれ検出器、変換器、PID制御器(コントローラ)、指示計器などが設備されている。本装置を用いた研修では、コントローラの比例(P)定数、積分(I)定数及び微分(D)定数を実際に設定変更させ、その時のループの応答特性、すなわちPID制御特性を体験学習している。(写真-10 参照)

## 2.2.7 水系ループ運転保守学習モデル

本装置では、水系ループの運転技術と保守技術の両方を学ぶことができる。運転技術については、ポンプの流量-水頭圧特性を測定したり、締切運転や過大流量運転、ポンプキャビテーションなどの運転異常状態を再現模擬し、同状態下におけるループ運転を体験学習する。また、保守技術については、ポンプを始めとして弁や配管支持装置の分解点検、計器の校正などを学んでいる。なお、ポンプの分解点検については、分解点検前と後の運転特性を比較分析するなど、単なる分解組立作業要領の習熟という視点ではなく、ループ運転の健全性確保という視点から分解点検の重要性を学ぶことを指導している。(写真-11 参照)

## 2.2.8 圧力開放板交換学習モデル

「もんじゅ」の蒸気発生器で伝熱管が破損するとナトリウム-水反応と呼ばれる激しい化学反応事象が生じ、蒸気発生器内の圧力が上昇する。この上昇した圧力を開放するものが圧力開放板で薄い金属の膜でできており、品質保証のために定期的に交換される。こ

の交換作業は、冷却材のナトリウムの腐食を防ぐために施されているカバーガスバウンダリの開放を伴う作業であり系内への空気混入や酸欠事故を防止する必要があるとともに、薄い金属膜である開放板を破損させることなく要領良く交換を行う必要があり熟練をする作業である。

本装置は、「もんじゅ」のナトリウムー水反応生成物収納設備の圧力開放板とその取付配管部を実寸法で模擬しており、本装置を使用した模擬交換作業を通じて、カバーガスバウンダリ開放作業におけるビニールバッグ等の取扱方法及び開放板の作業手順などを習得することができる。(写真-12 参照)

#### 2.2.9 非破壊検査技術学習モデル

液体浸透探傷検査や放射線透過探傷検査、磁粉探傷検査、超音波探傷検査の非破壊検査技術に関する学習モデルが備えている。

#### 2.2.10 その他

保守学校にはこの他、かつて「もんじゅ」用ナトリウム開発機器として実際に性能試験や耐久試験などに供されたナトリウムポンプや電磁ポンプなどの機器を内部構造が見えるようにカットモデル化し、機器の構造を学習する際の教材として活用している他、PA教材としても一般来客者の方に展示公開している。(写真-13 参照)



写真-5 二次主循環ポンプ軸封部学習モデル

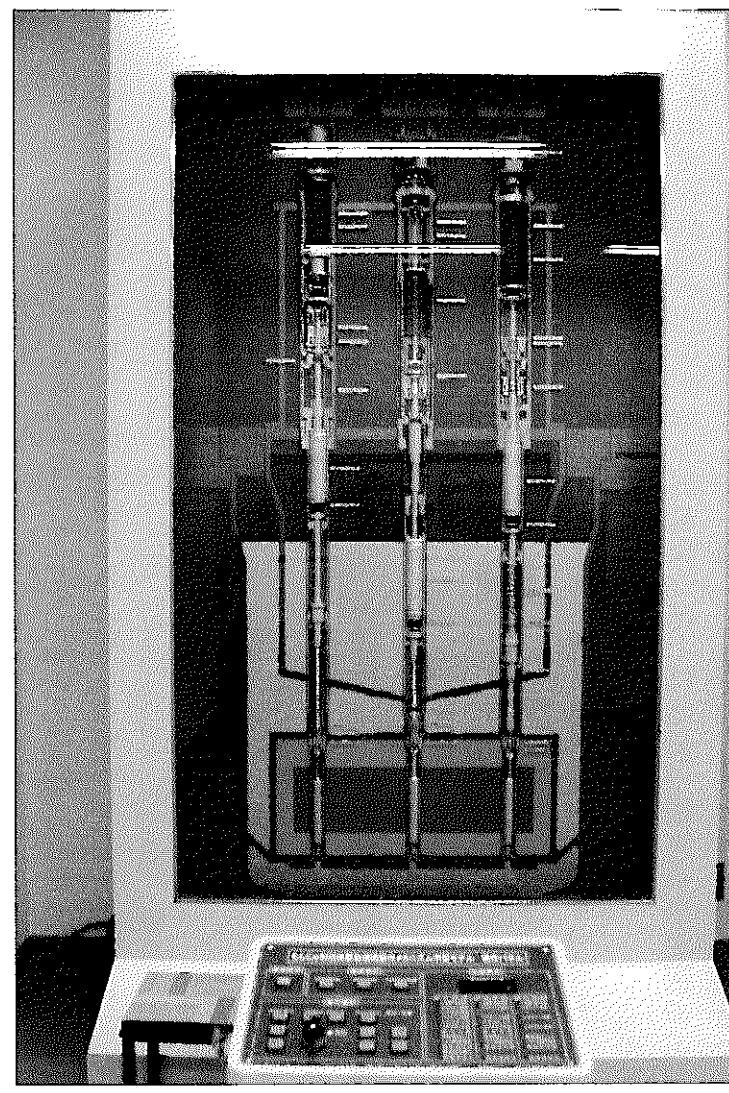


写真-6 制御棒駆動機構学習モデル

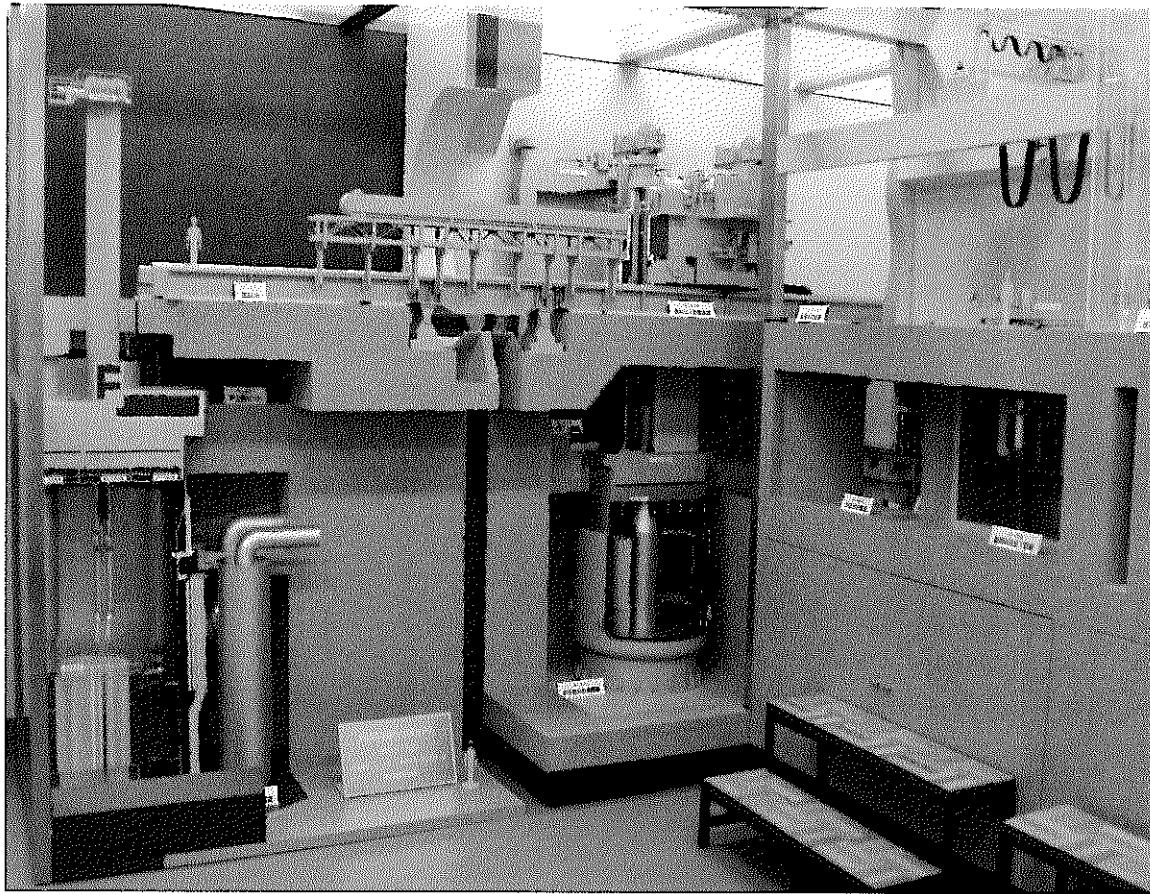


写真-7 燃料取扱動作学習モデル

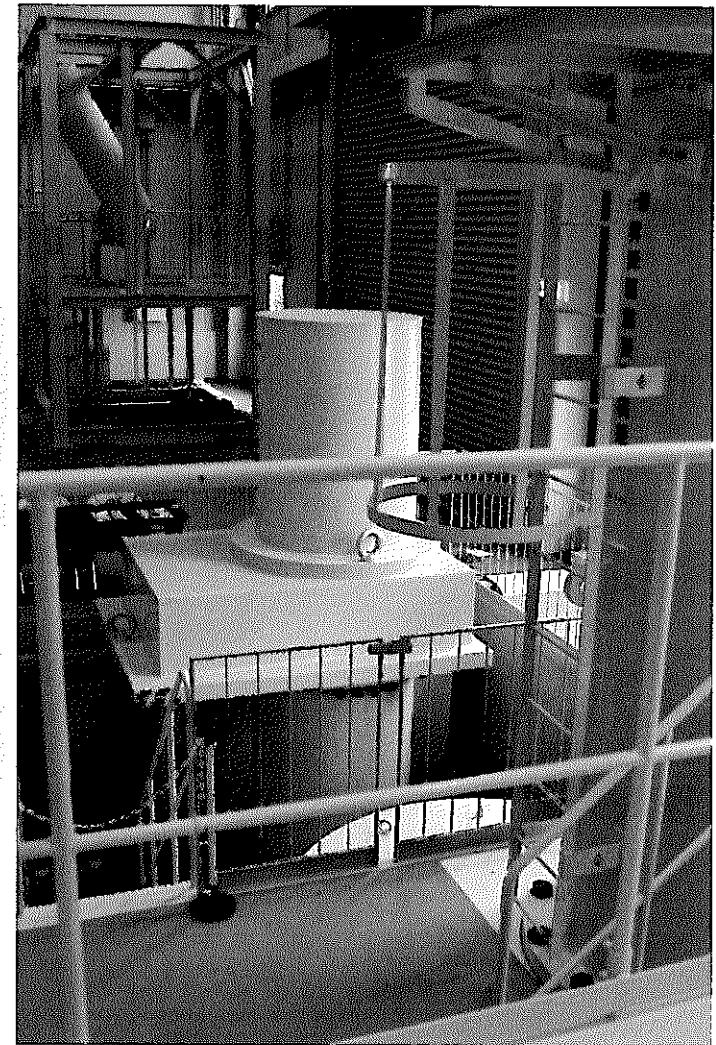


写真-8 炉上部燃料交換装置据付学習モデル

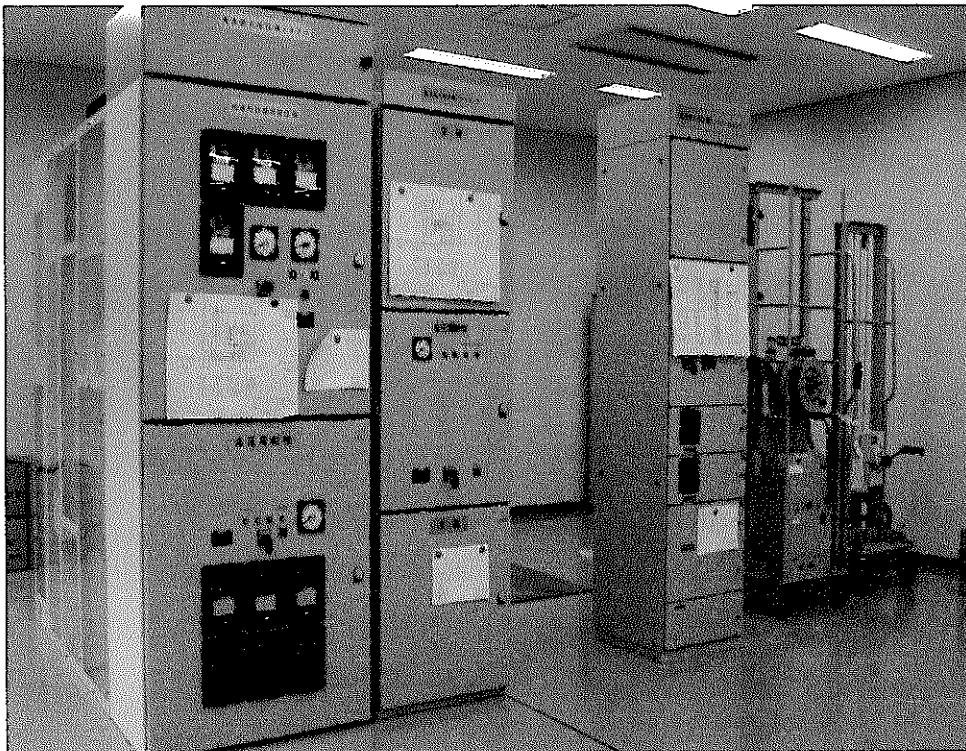


写真-9 電源盤点検学習モデル

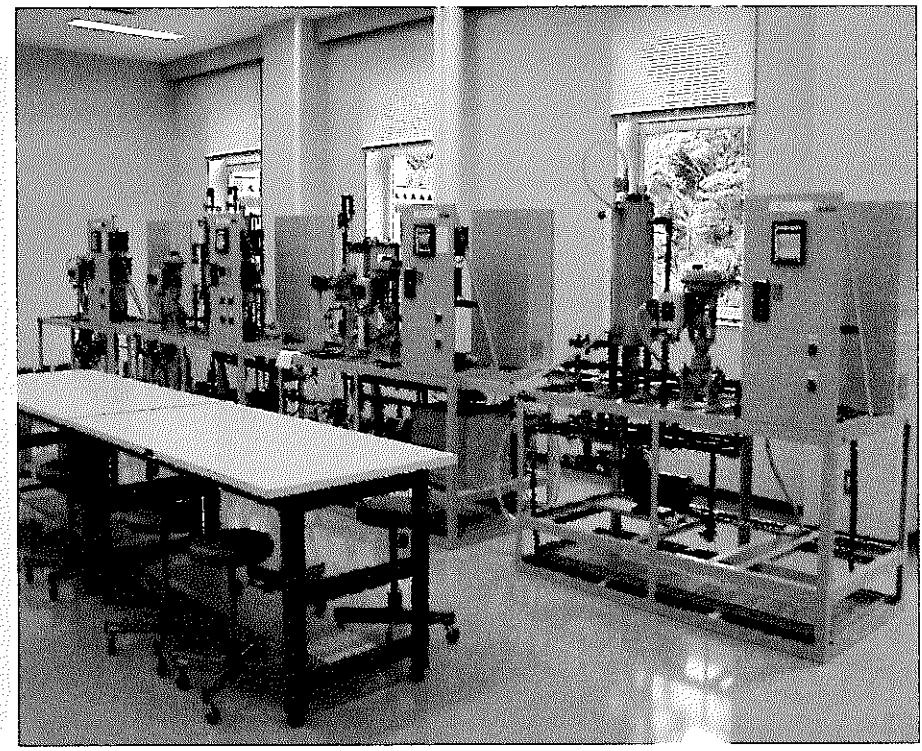


写真-10 計測制御学習モデル

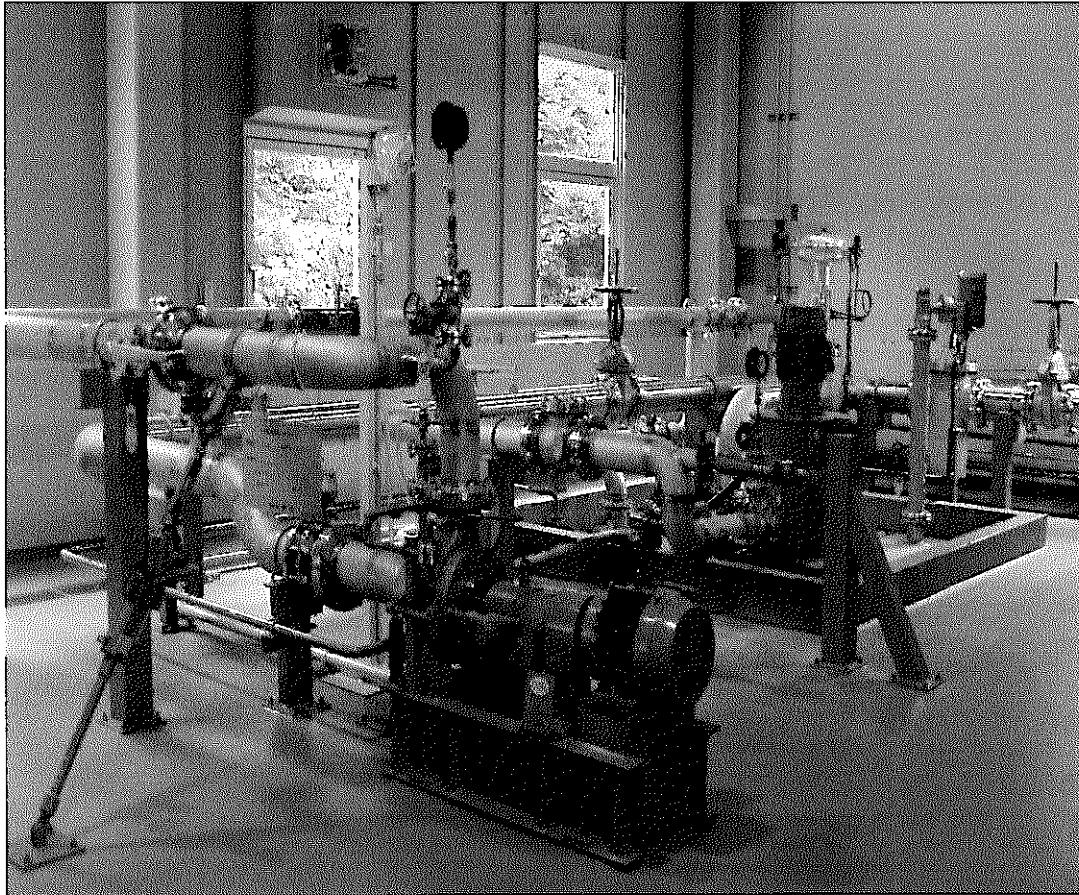


写真-11 水系ループ運転保守学習モデル

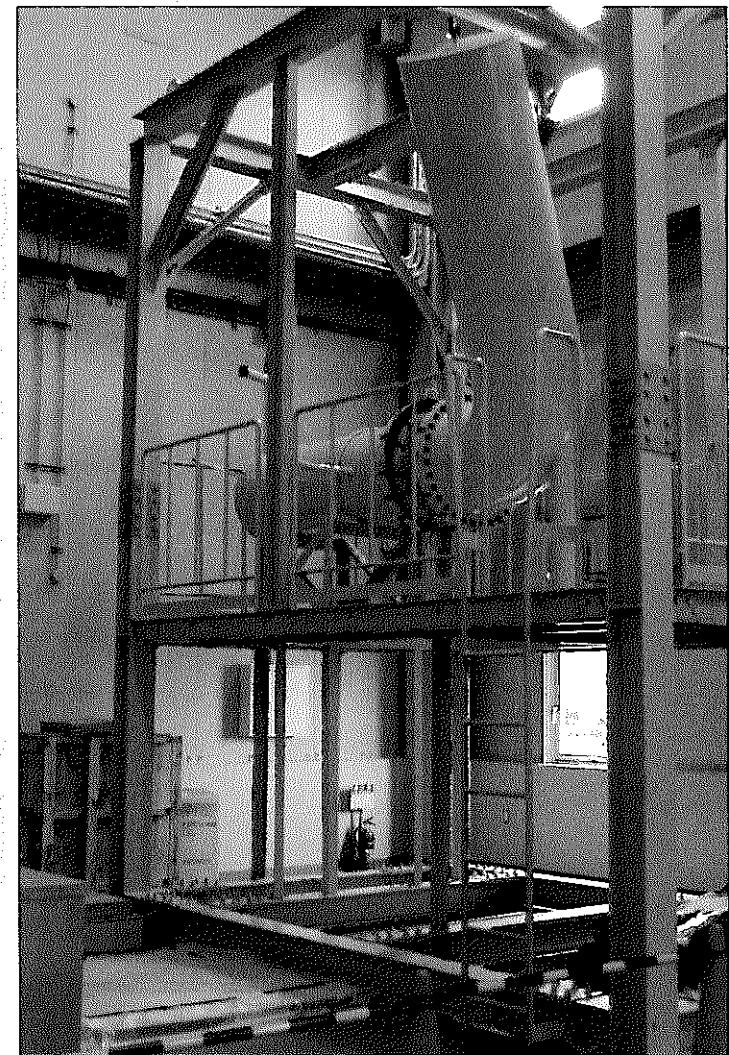


写真-12 圧力開放板交換学習モデル

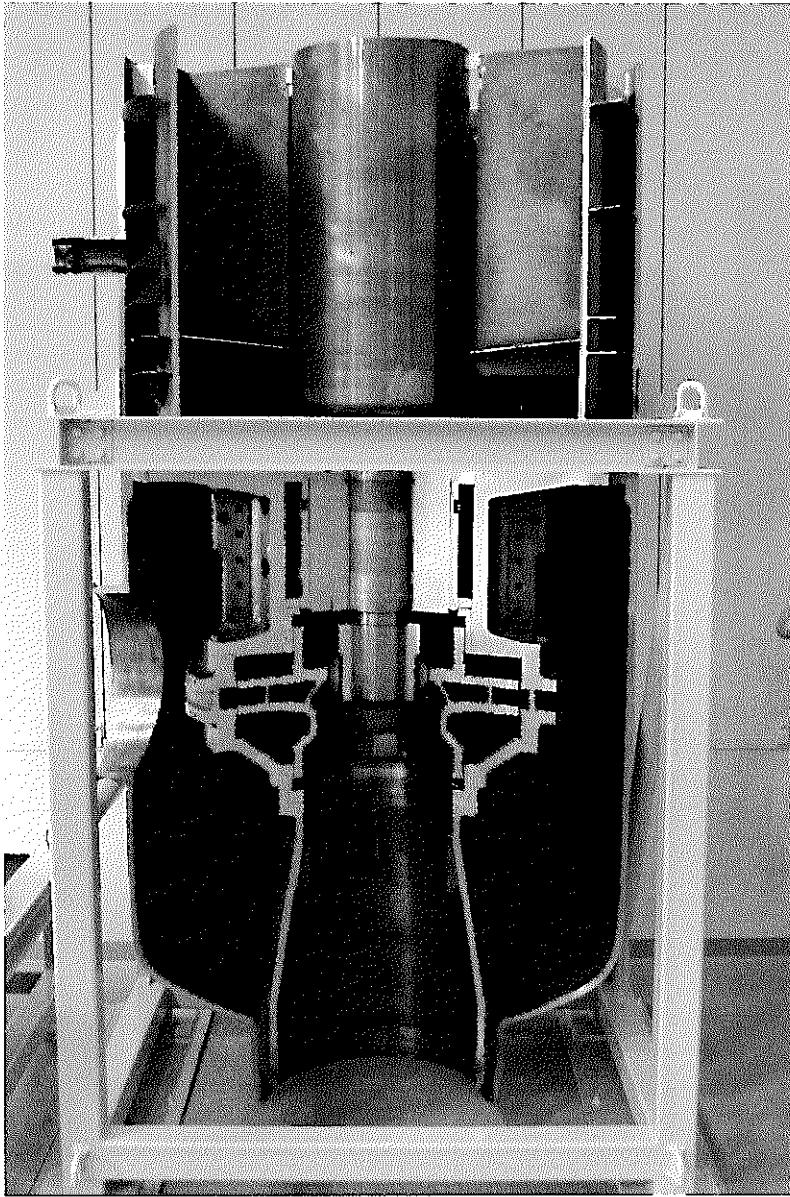


写真-13 ナトリウム機器カットモデル（1次主循環ポンプ下部）

### 3. 研修カリキュラムと研修テキストの策定・整備

#### 3.1 研修カリキュラムの策定

FBR サイクル総合研修項目の策定に当たっては、「効率良く知識・知見の習得が図れるようにする」ことを念頭に置き、例えばナトリウム研修では階層別コースの設定や研修コースの細分化などの工夫を行って 8 種類のナトリウム研修コースと 9 種類の保守研修コースを設定した。

ナトリウム研修項目		保守研修項目	
①	ナトリウム入門コース	①	メカシール分解点検作業コース
②	ナトリウム基礎実験一般コース	②	制御棒駆動機構コース
③	ナトリウム基礎実験専門コース	③	燃料取扱及び貯蔵設備コース
④	ナトリウム消火訓練コース	④	燃料交換準備・後始末作業コース
⑤	ナトリウムループ供給系運転コース	⑤	電源盤点検作業コース
⑥	ナトリウムループ純化系運転コース	⑥	計測制御コース
⑦	ナトリウム配管漏洩対応訓練コース	⑦	水系機器運転保守コース
⑧	ナトリウム配管滴下漏洩観察コース	⑧	圧力開放板交換作業コース
一	—	⑨	非破壊検査コース

平成 12 年度においては準備期間の関係上全ての研修を実施することはできず上表のうち、ナトリウム漏洩関係を除く 6 種類のナトリウム研修と圧力開放板交換作業を除く 8 種類の保守研修を実施した。平成 12 年度における研修カリキュラムを表-3 に示す。

#### 3.2 研修テキストの作成・整備

次に示す全てのナトリウム研修項目と保守研修項目の一部については、当実技訓練グループが講義及び実技とも担当して研修を進めることとしたが、それ以外のメカシール分解点検など専門的技術経験を要するものについては外部講師を招聘して研修を行うこととした。当グループ担当分の研修を行うに当たっては、グループ員の培った経験等を反映させて研修テキストを新規に作成・整備した。

##### <ナトリウム研修：全ての研修項目>

- ・ナトリウム入門コース
- ・ナトリウム基礎実験一般コース
- ・ナトリウム基礎実験専門コース
- ・ナトリウム消火訓練コース
- ・ナトリウムループ供給系運転コース
- ・ナトリウムループ純化系運転コース

##### <保守研修：2 種類の研修項目>

- ・制御棒駆動機構コース
- ・燃料取扱及び貯蔵設備コース

研修テキストの参考例として付録-1 に「ナトリウム基礎実験専門コース」を、また付録-2 に「制御棒駆動機構コース」を示す。

表-3 研修カリキュラム (1/2)

【ナトリウム研修】

No.	講座名 (日数)	概 要
①	ナトリウム入門コース (1日間)	日常業務ではナトリウムと直接関わることの少ない方を対象に、“ナトリウムとはどんな物か、何故ナトリウムは「もんじゅ」の冷却材として使われるのか”等のナトリウムに関する基礎的な知識を学習する。
②	ナトリウム基礎実験 一般コース (1日間)	ナトリウムの特徴や熱媒体としての諸特性など、F B R技術者として習得すべきナトリウムに関する一般的な知識を学習する。
③	ナトリウム基礎実験 専門コース (2日間)	ナトリウムの化学的性質や物理的諸特性を論理的・定量的に学習するほか、腐食や漏えい事故等のプラントに関連する事柄など、「もんじゅ」の運転・保守員やナトリウム取扱業務に従事する方が習得すべきナトリウムに関する専門的な知識を学習する。
④	ナトリウム消火 訓練コース (1日間)	高速炉プラントの運転・保守に携わる方、またナトリウム取扱業務に従事する方が習得すべきナトリウム火災時の対応技術を学習する。
⑤	ナトリウムループ 供給系運転コース (各3.5日間)	高速炉プラントの運転・保守に携わる方が習得すべきナトリウムループ関連の運転技術のうち、特にナトリウム充填・ドレン操作、ナトリウム計装機器の校正および電磁ポンプ運転特性に関する運転技術について学習する。
⑥	ナトリウムループ 純化系運転コース (2.5日間)	高速炉プラントの運転・保守に携わる方が習得すべきナトリウムループ関連の運転技術のうち、特に純化系運転に関する運転技術について学習する。

表-3 研修カリキュラム (2/2)

【保守研修】

No.	講座名（日数）	概要
①	メカニカルシール 分解点検作業コース (2日間)	2次主冷却系主循環ポンプの軸封部の分解点検作業を通して、メカニカルシールの分解点検や軸封部への取付調整等の実務を学習する。
②	制御棒駆動機構コース (1日間)	高速増殖炉「もんじゅ」の3種類の制御棒駆動機構について、内部構造や動作、保守点検のポイントなど、設備の基本的な知識を学習する。
③	燃料取扱及び 貯蔵設備コース (1日間)	高速増殖炉「もんじゅ」の燃料取扱及び貯蔵設備について、設備構成、燃料移送ルート、燃料交換スケジュールなど、設備全体の基本的な知識を学習する。
④	燃料交換準備・ 後始末作業コース (5日間)	燃料交換準備・後始末作業を通じて、炉上部での大型キャスクの取り扱いや、FHM本体と昇降駆動装置の接続・切離等の実務を学習する。
⑤	電源盤点検作業コース (2日間)	電源盤（メタクラ、パワーセンタ、コントロールセンタ）及びその収納機器（遮断器、保護継電器など）の構造・原理と、保守点検作業の実務を学習する。
⑥	計測制御コース (3日間)	工業計器の運転、保守を行うために必要な、計測制御についての基礎的知識と技術を学習する。
⑦	水系機器運転・保守コース (5日間)	ポンプや弁などの水系機器の構造・原理を学習するとともに、実際の水ループの運転操作やポンプの異常状態運転、更にはポンプの分解点検や弁等の保守点検実習を通じて水系機器の基本的な運転技術及び保守技術を学習する。
⑧	非破壊検査コース (3日間)	非破壊検査技術の概要と検査体系について学習するとともに、浸透探傷試験、放射線透過試験の知識・技術を学習する。

#### 4. 研修成果評価手法の考案・導入

従来型の研修は、やりっぱなしで終わる研修が多く、そのような研修では「もんじゅ」の運転再開に向けて運転員や保守員の教育研修を十分に果たせているとは言い難い。そこで、新たに「研修成果評価手法」を考案しナトリウム研修及び一部保守研修に導入した。この手法は、「チャレンジクイズ」なる技能確認試験を研修前に先ず実施し、受講前における自分の知識度を点数で把握した後、研修後もう一度同じ内容のクイズを受けてその知識度がどの程度アップしたかを自らが定量的に把握するという方法である。クイズの内容は講義内容に基づいて出題しており、これにより受講者はどのような点が把握でき、どのような点を未だ完全に理解できていないかを自らが把握することができる仕組みとなっている。この評価手法は、12年度の研修においては準備期間の関係上、当実技訓練グループ担当研修分にのみ適用して行ったが、次年度以降その適用範囲を適宜拡充して行く所存である。付録-3に参考例として「基礎実験専門コース」のチャレンジナトリウムクイズを示す。

#### 5. 平成12年度における研修実績

表-4に平成12年度におけるFBRサイクル総合研修の実績表を示す。同研修施設は正式には平成12年10月24日が「開校日」ということであるが、研修業務的にはそれに先立つ9月から既に開始しており、ナトリウム研修ではナトリウム配管漏洩関係を除く6種類の研修コースを22回、また保守研修では圧力開放板交換作業コースを除く8種類の研修コースを11回実施した。総受講者数は305名で、内訳はサイクル機構関係者が230名、地元の美方消防組合員が70名、そして敦賀工業高校の5名（体験実習）であった。研修実績工程を表-4に、また参加者の一覧を表-5に示す。

表-4 平成12年度研修実績工程表

		1 金	2 土	3 日	4 月	5 火	6 水	7 木	8 金	9 土	10 日	11 月	12 火	13 水	14 木	15 金	16 土	17 日	18 月	19 火	20 水	21 木	22 金	23 土	24 日	25 月	26 火	27 水	28 木	29 金	30 土	
9月	Na棟																															
	保守棟																															
10月	Na棟	1 日	2 月	3 火	4 水	5 木	6 金	7 土	8 日	9 月	10 火	11 水	12 木	13 金	14 土	15 日	16 月	17 火	18 水	19 木	20 金	21 土	22 日	23 月	24 火	25 水	26 木	27 金	28 土	29 日	30 月	31 火
	保守棟																															
11月	Na棟	1 水	2 木	3 金	4 土	5 日	6 月	7 火	8 水	9 木	10 金	11 土	12 日	13 月	14 火	15 水	16 木	17 金	18 土	19 日	20 月	21 火	22 水	23 木	24 金	25 土	26 日	27 月	28 火	29 水	30 木	
	保守棟																															
12年 ／ 12月	Na棟	1 金	2 土	3 日	4 月	5 火	6 水	7 木	8 金	9 土	10 日	11 月	12 火	13 水	14 木	15 金	16 土	17 日	18 月	19 火	20 水	21 木	22 金	23 土	24 日	25 月	26 火	27 水	28 木	29 金	30 土	31 日
	保守棟																															

表-4 平成12年度研修実績工程表

		1 月 火 水 木 金 土 日	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
13年 / 1月	Na棟																															
	保守棟																															
2月	Na棟	1 木 金 土 日 月	2 火 水 木 金 土 日	3 木 金 土 日 月	4 火 水 木 金 土 日	5 木 金 土 日 月	6 火 水 木 金 土 日	7 木 金 土 日 月	8 火 水 木 金 土 日	9 木 金 土 日 月	10 火 水 木 金 土 日	11 木 金 土 日 月	12 火 水 木 金 土 日	13 木 金 土 日 月	14 火 水 木 金 土 日	15 木 金 土 日 月	16 火 水 木 金 土 日	17 木 金 土 日 月	18 火 水 木 金 土 日	19 木 金 土 日 月	20 火 水 木 金 土 日	21 木 金 土 日 月	22 火 水 木 金 土 日	23 木 金 土 日 月	24 火 水 木 金 土 日	25 木 金 土 日 月	26 火 水 木 金 土 日	27 木 金 土 日 月	28 火 水 木 金 土 日	29 木 金 土 日 月	30 火 水 木 金 土 日	31 木 金 土 日 月
	保守棟																															
3月	Na棟																															
	保守棟																															

平成12年度 研修受講者数実績

実施日	コース名	もんじゅ	ふげん	大洗	業務協力員	その他	計
ナトリウム取扱研修	No.3 ナトリウム基礎実験専門コース	9人	0人	1人	2人	-人	12人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	9人	0人	0人	1人	-人	10人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	10人	0人	0人	0人	-人	10人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	6人	0人	0人	1人	-人	7人
	No.1 ナトリウム入門コース	3人	0人	0人	3人	-人	6人
	No.2 ナトリウム基礎実験一般コース	3人	0人	0人	4人	-人	7人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	10人	0人	0人	0人	-人	10人
	No.5 ナトリウムループ供給系運転コース	3人	0人	0人	1人	-人	4人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	9人	0人	0人	0人	-人	9人
	No.1 ナトリウム入門コース	3人	0人	0人	1人	-人	4人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	11人	0人	0人	0人	-人	11人
	No.2 ナトリウム基礎実験一般コース	4人	0人	0人	3人	-人	7人
	No.3 ナトリウム基礎実験専門コース	2人	0人	0人	2人	-人	4人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	8人	0人	0人	0人	-人	8人
	No.4 ナトリウムループ純化系運転コース	2人	0人	2人	1人	-人	5人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	11人	0人	0人	0人	-人	11人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	3人	0人	0人	3人	-人	6人
	No.6 ナトリウム消火訓練コース	6人	0人	0人	0人	-人	6人
小計		112人	0人	3人	22人	-人	137人
保守作業研修	No.15 電源盤点検作業コース	10人	0人	0人	6人	-人	16人
	No.16 計測制御コース(温度ループのみ)	11人	0人	0人	4人	-人	15人
	No.12 メカニカルシール分解点検作業コース	2人	0人	0人	3人	-人	5人
	No.11 燃料交換準備・後始末作業コース	1人	0人	0人	6人	-人	7人
	No.10 制御棒駆動機構コース	3人	0人	0人	3人	-人	6人
	No.13 水系機器 運転コース	5人	0人	0人	3人	-人	8人
	No.14 水系機器保守コース	0人	4人	0人	2人	-人	6人
	No.16 計測制御コース	3人	4人	0人	3人	-人	10人
	No.15 電源盤点検作業コース	3人	1人	0人	2人	-人	6人
	No.9 燃料取扱及び貯蔵設備コース	5人	0人	0人	4人	-人	9人
	No.17 非破壊検査コース	0人	5人	0人	0人	-人	5人
小計		43人	14人	0人	36人	-人	93人
その他	敦賀美方消防組合Na消火訓練	-人	-人	-人	-人	27人	27人
	敦賀美方消防組合Na消火訓練	-人	-人	-人	-人	28人	28人
	敦賀美方消防組合Na消火訓練	-人	-人	-人	-人	15人	15人
	敦賀工業高校生Na研修	-人	-人	-人	-人	5人	5人
	小計	-人	-人	-人	-人	75人	75人
合計		155人	14人	3人	58人	75人	305人

## 6. 研修成果の分析・評価

### 6.1 ナトリウム研修

#### 6.1.1 ナトリウム入門コース

ナトリウム入門コースは平成12年12月と平成13年1月の2回実施した。述べ受講者数は11名である。

##### (研修内容)

- ・講義
- ・チャレンジナトリウムクイズ
- ・ナトリウム燃焼観察

##### (講義内容)

- ◆第1講：ナトリウムの性質
- ◆第2講：ナトリウム燃焼及び水との反応
- ◆第3講：人体への影響
- ◆第4講：冷却材に利用される理由

##### (研修成果の分析・評価)

2回分のチャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

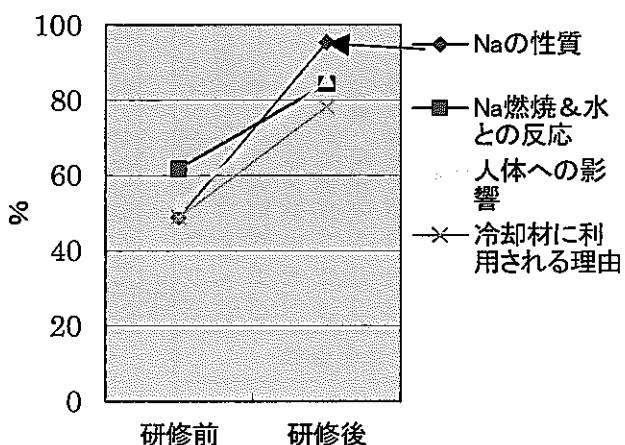
【総合得点】 (100点満点)

	最高点	平均点	最低点
研修前	84	52.4	20
研修後	96	84.4	56

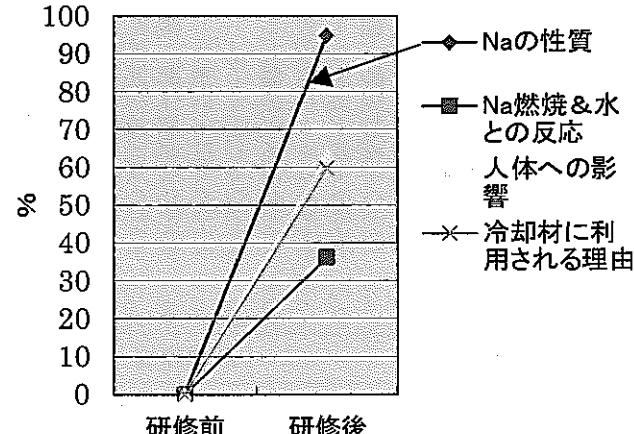
##### 【科目別平均点数】

(研修前後の%数値は正解率)

	Naの性質	Na燃焼及び水との反応	人体への影響	冷却材に利用される理由
研修前	49%	62%	52.5%	49%
研修後	95.5%	84.5%	85.5%	78.3%
アップ率	94.9%	36.3%	62.9%	59.8%



【研修前後の科目別点数比較】



【科目別点数のアップ率】

前表に示すように、研修前におけるチャレンジ・ナトリウムクイズの平均点は 52.4 点であったものが研修後は 84.4 点にアップした。科目別に見ると、「冷却材に利用される理由」の理解度が最も低い値であったがそれでも 78.3% と十分満足の行く理解度であり、「ナトリウムの性質」については全員がほぼ完璧に近い形で習得できていることが伺えた。これより研修によって受講生のナトリウムに関する基礎知識が大幅に改善できたものと分析・評価できる。

なお、研修後に実施しているアンケート調査では、11人中 8名が「大いに有益であった」で、残り 3名が「まあまあ有益」であったとの感想であった。これより研修は、成功裏に実施できたものと分析できる。

### 6.1.2 ナトリウム基礎実験一般コース

ナトリウム基礎実験一般コースは平成 12 年 12 月と平成 13 年 1 月の 2 回実施した。述べ受講者数は 14 名である。

#### (研修内容)

- ・講義
- ・チャレンジナトリウムクイズ
- ・ナトリウム燃焼観察
- ・ナトリウム物理特性測定実験（基本特性）

#### (講義内容)

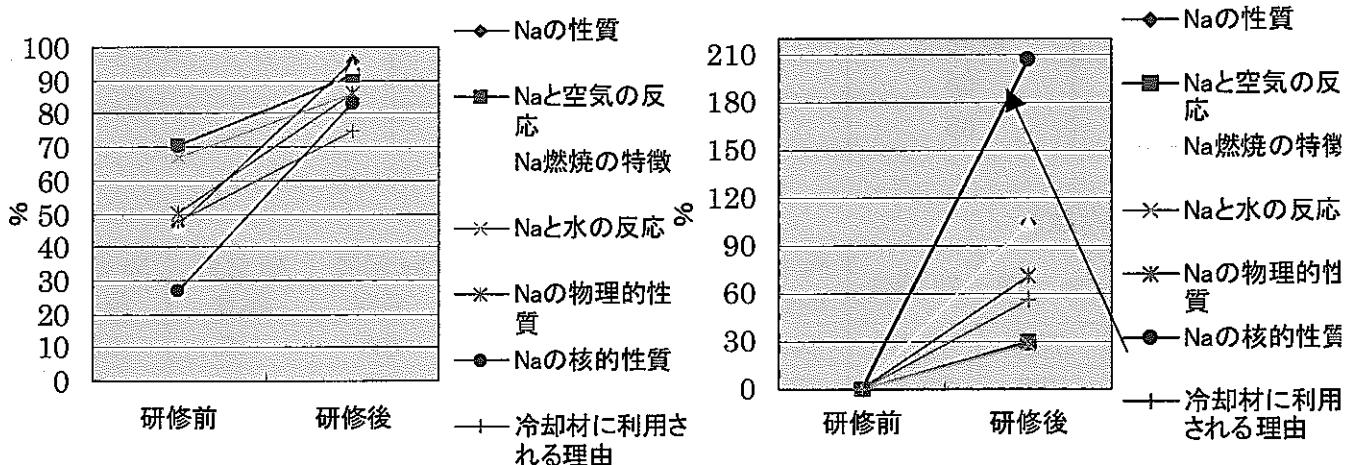
◆第 1 講：ナトリウム一般	◆第 5 講：ナトリウムと水の反応
◆第 2 講：ナトリウムの特徴	◆第 6 講：ナトリウムの物理的性質
◆第 3 講：ナトリウムと空気の反応	◆第 7 講：ナトリウムの放射性同位元素
◆第 4 講：ナトリウム燃焼の特徴	◆第 8 講：冷却材に利用される理由

#### (研修成果の分析・評価)

2回分のチャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

【総合得点】 (100 点満点)

	最高点	平均点	最低点
研修前	78	50.1	16
研修後	96	81.9	54



本コースは全部では、ナトリウムに関する基礎知識を8講に分けて幅広く学習する他、物性値の基礎測定実験も体験学習している。チャレンジ・ナトリウムクイズに見る研修成果は、研修前の平均点50.1点が研修後には81.9点という高得点にアップした。科目別に見ると、「冷却材に利用される理由」を除いて軒並み80点台から90点以上の正解率であり、殆どの受講生が完璧に近い形で理解していることが伺える。中でも「ナトリウム核的性質」は200%を越すアップ率が得られており、研修によって受講生の知識度が大幅に改善されたことが実証されている。

なお、アンケート調査では「大いに有益」との感想を寄せてくれた受講生は6名に止まり、「まあまあ有益」との感想が8名であった。研修主催者側からすれば知識度が大幅に向上した点などに鑑みて、もう少し「大いに有益」との感想を多くの受講生から寄せられることを期待していたが、なかなか厳しい評価であり研修の難しさを改めて感じた。この結果を教訓材料として、“有意義な研修である”と感じてもらえるよう今後とも努力してゆく所存である。

### 6.1.3 ナトリウム基礎実験専門コース

ナトリウム基礎実験専門コースは平成12年10月と平成13年2月の2回実施した。述べ受講者数は16名である。

#### (研修内容)

- ・講義
- ・チャレンジナトリウムクイズ
- ・ナトリウム燃焼観察
- ・ナトリウム物理特性測定実験

#### (講義内容)

◆第1講：ナトリウム一般	◆第5講：ナトリウムの核的性質
◆第2講：冷却材ナトリウムの特長	◆第6講：ナトリウムによる材料腐食
◆第3講：ナトリウムの化学的性質	◆第7講：ナトリウムの純度管理
◆第4講：ナトリウムの物理的性質	◆第8講：ナトリウム取扱法規

#### (研修成果の分析・評価)

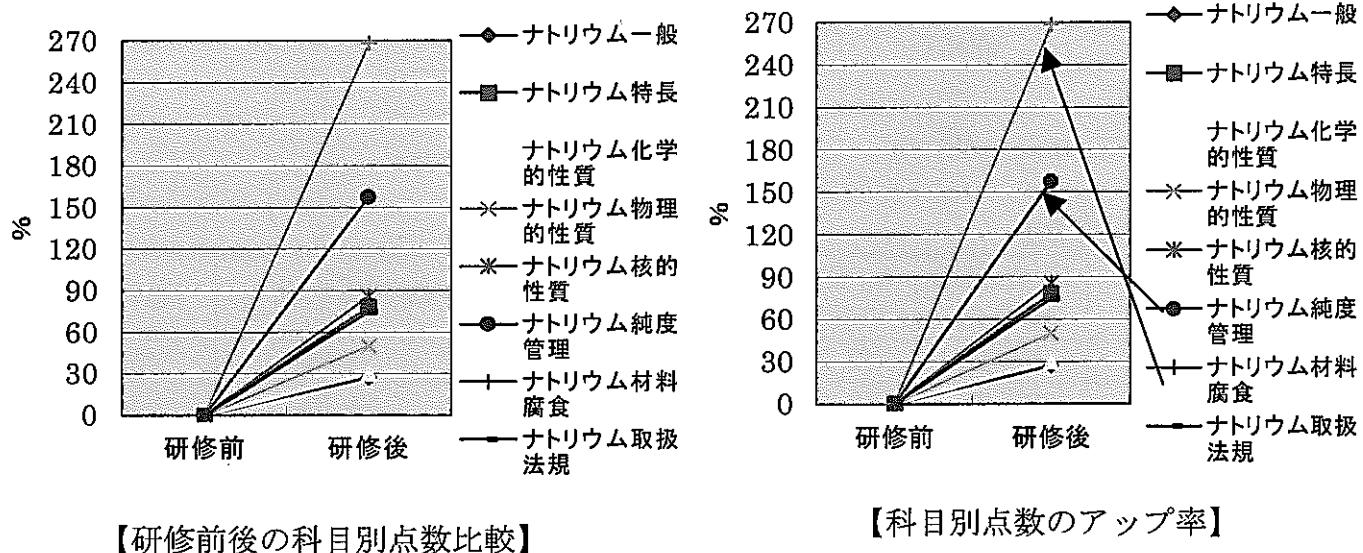
2回分のチャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

#### 【総合得点】 (100点満点)

	最高点	平均点	最低点
研修前	66	42.7	30
研修後	86	72.8	55

#### 【科目別平均点数】

	Na一般	Na特長	Na化学的性質	Na物理的性質	Na核的性質	Na純度管理	Na材料腐食	Na取扱法規
研修前	70%	45.3%	60.5%	40%	35%	26%	19%	40%
研修後	89%	80.7%	78.5%	60%	65%	67%	70%	70%
アップ率	27.1%	78.1%	29.8%	50%	85.7%	157.7%	268.4%	75%



【研修前後の科目別点数比較】

【科目別点数のアップ率】

本コースでは、ナトリウムに関する知識を幅広く且つある程度深く学習する他、ある程度専門的なナトリウム物性測定実験を実施している。チャレンジナトリウムクイズの科目別平均点数結果に見られるように、研修前における受講生の「Na の核的性質」「Na の純度管理」及び「Na による材料腐食」に関する知識度は 10%～30% 台で、ナトリウム取扱技術者として十分とは言い難いレベルであったが、研修後の驚異的なアップ率に見られるように受講生の知識度は飛躍的に改善された。全科目の平均点は 42.7 点から 72.8 点に向かっており、Na 純度管理や腐食に関する知識ばかりでなくナトリウムに関する知識度を全体的に底上げできたものと評価できる。

なお、アンケート調査は第 1 回目が「大いに有益」との感想者は 11 名中 4 名と少なかったが、第 2 回目は 4 名中 3 名に増えた。第 1 回目は「ナトリウム学校」の開校日に合わせて行ったもので講師として初めての経験ということもあり、余り高い評価は得られなかつたようだが、第 2 回目は講師としての経験も増えたことで受講生の評価も高くなつたものと分析する。

#### 6.1.4 ナトリウム消火訓練コース

ナトリウム消火訓練コースは平成 12 年 11 月から平成 13 年 3 月にかけて計 10 回実施した。述べ受講者数は 85 名である。

##### (研修内容)

- ・講義 　・チャレンジナトリウムクイズ 　・ナトリウム燃焼観察（空気中と窒素ガス中）
- ・実習：ナトリウム燃焼消火訓練 　・実習：洗浄処理作業

##### (講義内容)

◆第 1 講：ナトリウムと空気の反応	◆第 4 講：人体への影響と応急処置
◆第 2 講：ナトリウム燃焼の特徴	◆第 5 講：ナトリウム燃焼の消火
◆第 3 講：ナトリウムと水の反応	◆第 6 講：洗浄処理

##### (研修成果の分析・評価)

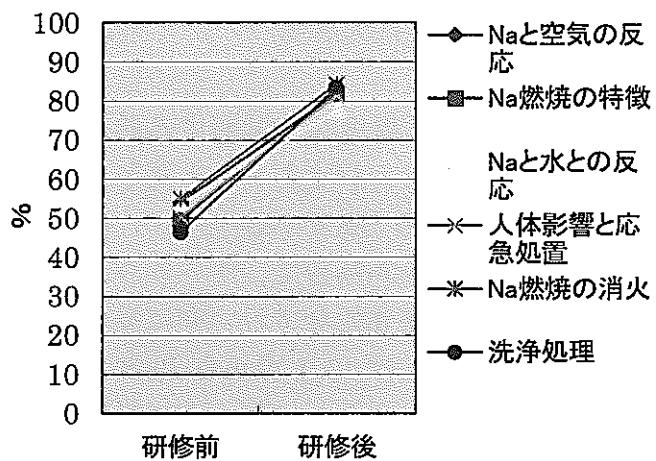
10 回分のチャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

**【総合得点】 (100点満点)**

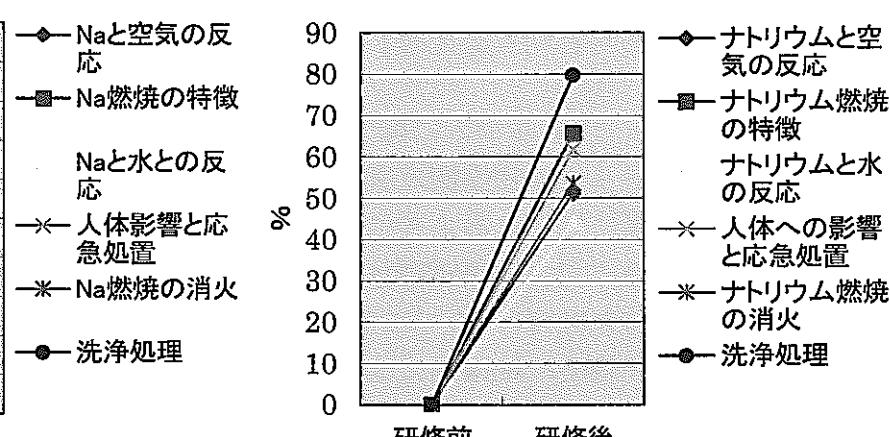
	最高点	平均点	最低点
研修前	96	51.8	8
研修後	100	81.9	12

**【科目別平均点数】**

	Naと空気の反応	Na燃焼の特徴	Naと水との反応	人体への影響	Na燃焼の消火	洗浄処理
研修前	54.1%	49.5%	53.9%	50.3%	54.9%	46.4%
研修後	81.8%	82.0%	77.6%	81.4%	84.3%	83.4%
アップ率	51.2%	65.7%	44%	61.8%	53.6%	79.7%



【研修前後の科目別点数比較】



【科目別点数のアップ率】

本コースは、「もんじゅ」自衛消防隊員と「もんじゅ」運転員を対象として実施しており、年1回必須の研修コースであり、これまで大洗工学センターにおいて実施してきた研修である。「ナトリウム学校」の開校に伴い、平成12年度より当研修施設を利用した研修をスタートしたが、本コースでは大洗工学センターでの研修では実施することのできなかったガラス窓越しによる空気中と不活性ガス（窒素ガス）中とのナトリウム燃焼の違いの観察や、エアロゾル中の視界度確認、刺激臭体験などより工夫を凝らした研修を実施するように心掛けた。また、ナトリウムに関する知識度についても、チャレンジナトリウムクイズの結果（研修前平均点51.8点→研修後平均点81.9点）より明らかなように受講生の知識度を大幅に向上させることができたものと評価できる。

なお、アンケート調査ではほぼ7割に当たる56名が「大いに有益」で残り3割の27名が「まあまあ有益」との感想であったが、出向者の2名より「有益でない」との感想も寄せられた。

### 6.1.5 ナトリウムループ供給系運転コース

ナトリウムループ供給系運転コースは平成12年12月に1回実施した。受講者数は4名である。

#### (研修内容)

- ・講義 　・ナトリウムループ運転実習 　・チャレンジ・ナトリウムクイズ

### (講義内容)

- ◆第1講：ナトリウム冷却系の分類
- ◆第2講：「もんじゅ」1次・2次冷却系の設備仕様
- ◆第3講：「もんじゅ」1次・2次冷却系の設計根拠
- ◆第4講：ナトリウム特有の機器（電磁ポンプ）
- ◆第5講：ナトリウム特有の計装機器（電磁流量計、NaK圧力計、Na液面計）

### (研修成果の分析・評価)

チャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

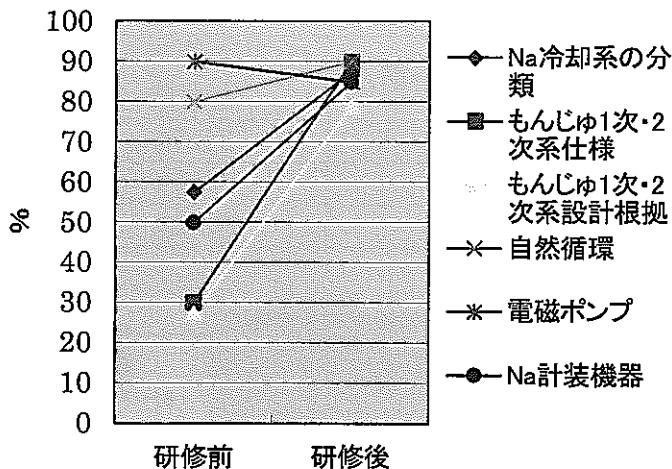
#### 【総合得点】

(100点満点)

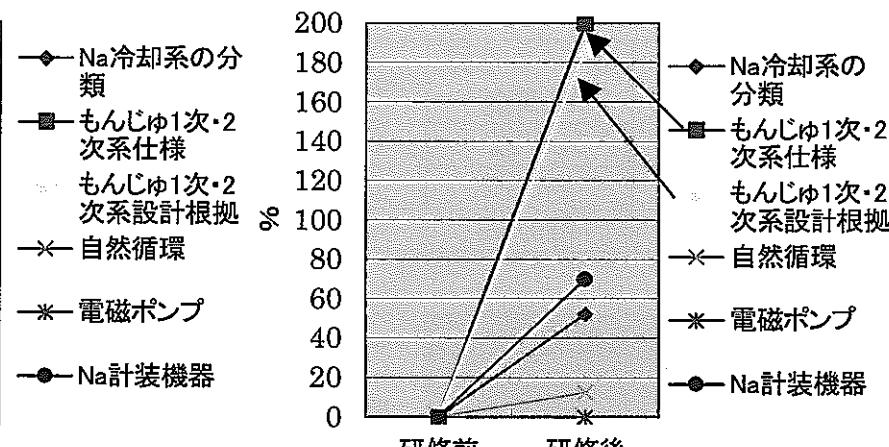
	最高点	平均点	最低点
研修前	78	47.5	24
研修後	96	84.0	66

#### 【科目別平均点数】

	Na冷却系の分類	もんじゅ1次2次系仕様	もんじゅ1次2次系設計根拠	自然循環	電磁ポンプ	Na計装機器
研修前	57.5%	30%	27.5%	47.5%	90%	50%
研修後	87.5%	90%	78.8%	90%	85%	85%
アップ率	52.2%	200.0%	186.5%	12.5%	0%	70%



【研修前後の科目別点数比較】



【科目別点数のアップ率】

本実習研修では、“受講生に考えさせる”ことを基本としたループ運転研修を行った。この指導方法はアンケート調査にも現れているように受講生には非常に好評であった。また、講義ではより幅広い運転知識の習得を目指す観点から「もんじゅ」主冷却系に係る設計根拠を中心とした座学を実施した。研修前は特に運転仕様と設計根拠に関する知識が乏しいことが伺えたが、チャレンジナトリウムクイズの結果に表れているように（平均点：研修前 47.5 点→研修後 84.0 点）本研修を通して受講生の「もんじゅ」冷却系に係る知識は大幅に向上したものと評価できる。

なお、アンケート調査では全員が「大いに有益」との感想であった。

### 6.1.6 ナトリウムループ純化系運転コース

ナトリウムループ純化系運転コースは平成13年2月に1回実施した。受講者数は5名である。

#### (研修内容)

- ・講義
- ・ナトリウムループ運転実習
- ・チャレンジ・ナトリウムクイズ

#### (講義内容)

- ◆第1講：ナトリウムによる材料の腐食
- ◆第2講：「もんじゅ」ナトリウムの純度管理
- ◆第3講：コールドトラップの原理と構造
- ◆第4講：プラギング計の原理と測定方法
- ◆第5講：「常陽」ナトリウム純化系の運転経験
- ◆第6講：ナトリウム純度管理に係る海外炉での事故例

#### (研修成果の分析・評価)

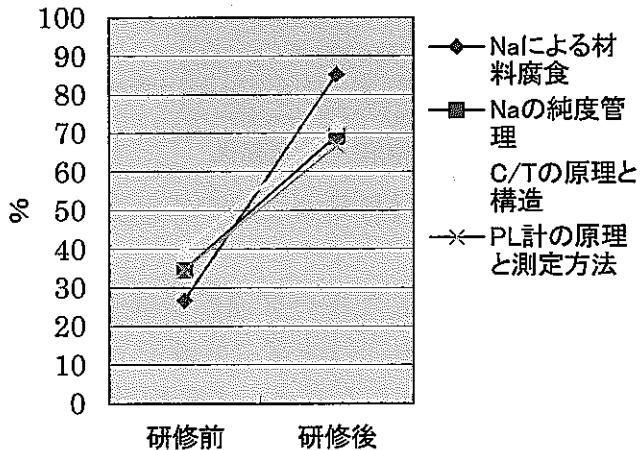
チャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

【総合得点】 (100点満点)

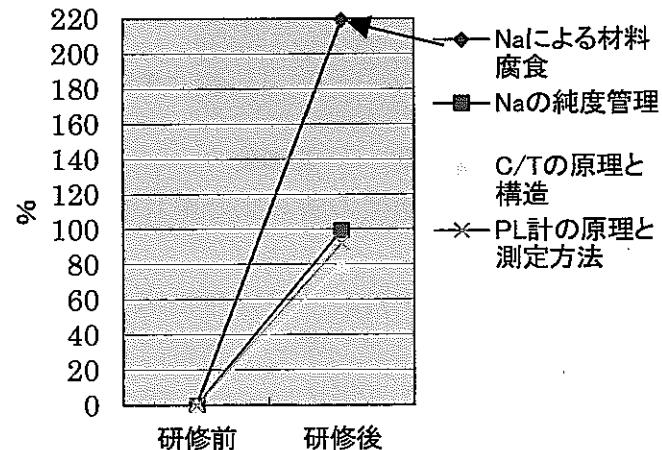
	最高点	平均点	最低点
研修前	54	32.8	10
研修後	84	73.6	40

#### 【科目別平均点数】

	Naによる材 料腐食	Naの純度管 理	C/Tの原理と構 造	PL計の原理と測 定方法
研修前	26.7%	34.7%	40%	34.7%
研修後	85.3%	69.3%	72%	66.7%
アップ率	219.5%	99.7%	80.0%	92.2%



【研修前後の科目別点数比較】



【科目別点数のアップ率】

研修生1名を除き本研修施設も含めてループ運転の経験は全くないという状況の下に研修を実施したが、ループの充填操作、C/T運転、PL計による不純度物濃度測定及びドレ

ン操作を無事体験・終了した。今回のループ運転実習においても「受講生主体の運転研修」を基本姿勢とし過渡の指導は行わなかった。アンケート結果にも表れている通り、受講生には概ね好評であった。

講義については、研修前は Na 純度管理に関する知識が乏しいことが伺えたが、研修後はチャレンジナトリウムクイズの結果（平均点研修前：32.8 点→研修後 73.6 点）に表れている通り知識が大幅に改善された。特に「Na による材料の腐食」に対する理解度が飛躍的に促進された。

なお、アンケート調査では「大いに有益」は 5 名中 2 名であり、残り 3 名が「まあまあ有益」との感想であったが、材料の腐食や純度管理に関する知識・知見を新たに習得できたことに対して受講生が余り有益であるとの感想を抱いないことは厳し過ぎる感想という感じを受けた。

## 6.2 保守研修

### 6.2.1 制御棒駆動機構コース

ナトリウムループ純化系運転コースは平成 13 年 1 月に 1 回実施した。受講者数は 8 名である。

#### (研修内容)

- ・講義
- ・動作メカニズム学習
- ・物知り診断クイズ

#### (講義内容)

- ◆第1講：反応度と原子炉出力
- ◆第2講：制御棒駆動機構の概要
- ◆第3講：微調整棒駆動機構の動作メカニズム
- ◆第4講：粗調整棒駆動機構の動作メカニズム
- ◆第5講：後備炉停止棒駆動機構の動作メカニズム

#### (研修成果の分析・評価)

チャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

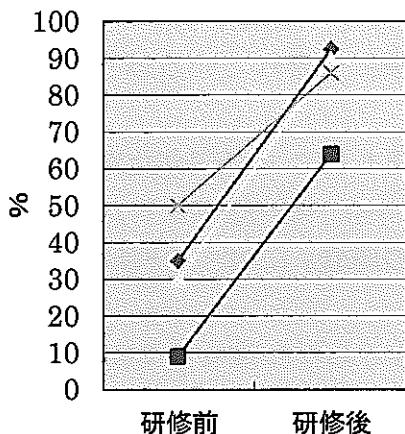
#### 【総合得点】

(100 点満点)

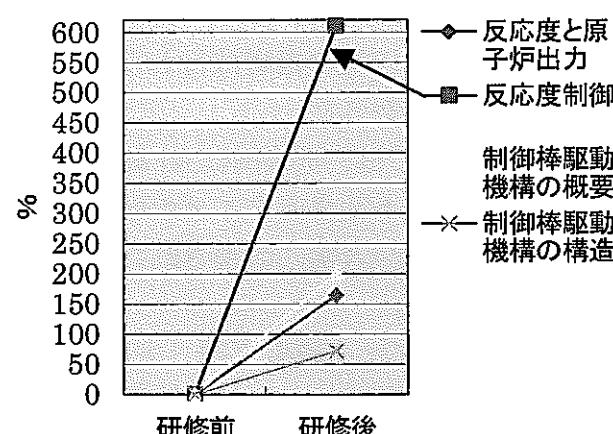
	最高点	平均点	最低点
研修前	72	32.8	0
研修後	98	84.0	70

#### 【科目別平均点数】

	反応度と原子炉出力	反応度制御	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構の構造
研修前	35%	9%	30%	50%
研修後	92.5%	64%	90%	86%
アップ率	164.3%	611.1%	200.0%	72%



【研修前後の科目別点数比較】



【科目別点数のアップ率】

保守研修棟には、制御棒駆動機構の構造と動作メカニズムの習熟することを目的として各制御棒駆動機構の駆動モデルが設備されているが、研修に当たっては、制御棒駆動機構のハードのみならず原子炉の運転において欠くことのできない知識である反応度制御など制御棒に係るソフト面も併せて講義に取り入れるなど、より幅広い研修となるように心掛けて教材テキストを準備して研修を実施した。

アンケート調査結果では受講生の半数が「大いに有益」、半数が「まあまあ有益」との感想であったが、講義内容をどの程度受講生が把握できたかを調べる「物知り診断クイズ」では、研修前の平均点 32.8 点を研修後は 84 点に飛躍的に向上させることができた。特に研修前は「反応度制御」に関する知識が乏しいことが伺えたが、研修後まあまあ満足できるレベルに向上させることができた。これより研修を通して研修生の CRD に関する知識、特に反応度制御などソフト面に関する知識を大幅に改善することができたものと評価できる。

### 6.2.2 燃料取扱及び貯蔵設備コース

燃料取扱及び貯蔵設備コースは平成 13 年 3 月に 1 回実施した。受講者数は 9 名である。

#### (研修内容)

- ・講義 　・模型による燃料取扱及び貯蔵作業の取扱フォロー 　・物知り診断クイズ

#### (講義内容)

- ◆第1講：燃料取扱及び貯蔵設備の概要
- ◆第2講：燃料取扱及び貯蔵設備機器の概要

#### (研修成果の分析・評価)

チャレンジナトリウムクイズの結果は次の通りである。

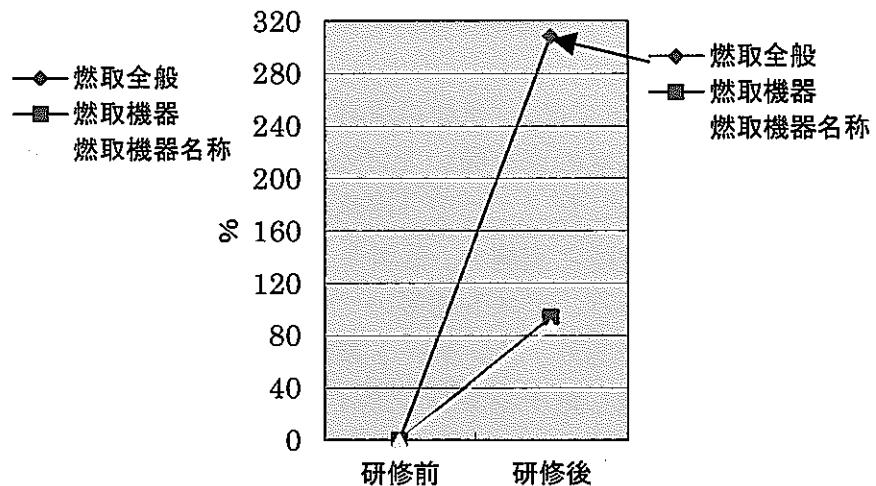
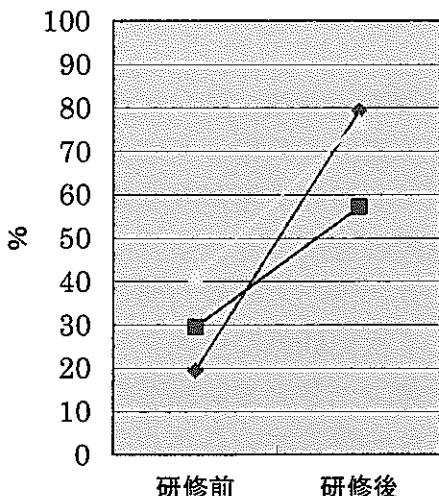
#### 【総合得点】

(100 点満点)

	最高点	平均点	最低点
研修前	56	27.8	4
研修後	88	70.0	44

【科目別平均点数】

	燃取全般	燃取機器	燃取機器名称
研修前	19.4%	29.4%	41.1%
研修後	79.4%	57.2%	76.7%
アップ率	309.3%	94.6%	86.6%



研修は、第1講で燃料取扱及び貯蔵設備の概要を説明した後、模型によって、燃料の受け入れから搬出までの移動経路、各設備機器の名称と配置及び機能について、また第2講で各機器の目的、機能、設計の考え方、機器の構成要素、動作及びトラブルに対する設計対策等について学習した。「物知り診断テスト」は、研修前が平均点27.8点であったのに対し、研修後は70.0点丁度にアップしますますの理解度と評価できる。

なお、アンケート調査では講義、実習とも全員が「大いに有益であった」と「良く理解できた」との感想を得ることができた。特に、模型による実習は、燃取設備を理解する上でその効果が大きかったようである。

## 7. 結 言

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」に隣接して新設された FBR サイクル総合研修施設には「ナトリウム学校」と「保守学校」が設けられており、平成 12 年 10 月 24 日より本格的にその運用が開始されている。平成 13 年 3 月末までに「ナトリウム学校」については 6 種類の研修コースを 22 回、「保守学校」では 8 種類のコースを 11 回、計 33 回の研修を開催し、「もんじゅ」の運転再開に向けた運転員や保守員の教育研修を鋭意進めているところである。

研修に当たっては、「研修成果評価手法」を新規に考案・導入した他、アンケート調査を実施して受講生の声を吸い上げるなど、より有意義な研修の遂行を目指して工夫を凝らした研修を遂行した。ここで「研修成果評価手法」とは、チャレンジクイズなる技能確認テストを研修前後に実施し、受講生自身が研修の成果を定量的に把握できるようにした評価システムである。テスト結果のデータは、講義の教え方や進め方などの良し悪しを如実に物語るものであり、アンケート調査とともに教訓材料として次回研修に反映させている。これまでに実施したチャレンジクイズの結果では、何れの研修コースとも研修前の平均点（20 点台後半～50 点台）を研修後は飛躍的にアップ（70 点台～80 点台）させることができており、「もんじゅ」運転員や保守員の育成において FBR サイクル総合研修が大いに貢献できているものと分析できる。

なお、FBR サイクル総合研修施設は「もんじゅ」運転員、保守員や JNC 関係者ばかりでなく、敦賀美方消防組合員や敦賀工業高校生のナトリウム研修にも活用されており、地元地域と密着した総合研修施設としての活用も図られている。

また、将来的には海外からの研修生の受入も検討して国際的な総合研修施設としての活用を目指すなど、よりグローバルな研修施設を目指す所存である。

## 8. 謝 辞

「第 1 回燃料取扱及び貯蔵設備コース」の実施に当たっては、富士電機㈱の船戸久雄氏（現：高速炉エンジニアリング㈱（FBEC）出向）に第 2 講の講師を担当するなど多大なるご協力を頂いた。

また、ナトリウム学校の施設運転については高速炉技術サービス㈱の浜野宏治氏、宮本厚氏、壇野正和氏に、保守学校の施設運転は同社の上杉隆徳氏及び前田寛和氏に多大なる助勢を頂いた。

ここに記して、厚くお礼を申し上げる。

## 9. 参考文献

- (1) 渡辺、上田他、“サイクル機構技報、No. 9 2000, 12”「FBR サイクル総合研修施設の設計・建設」、P17-28

## 10. 付 錄

## 付 錄

付録-1：ナトリウム研修テキスト例

「ナトリウム基礎実験専門コース」（縮小版）

付録-2：保守研修テキスト例

「制御棒駆動機構コース」（縮小版）

付録-3：チャレンジ・ナトリウムクイズ例「ナトリウム基礎実験専門コース」

付録-1：ナトリウム研修テキスト例

「ナトリウム基礎実験専門コース」（縮小版）

ナトリウム研修棟教育研修

## ナトリウム基礎実験専門コース

平成13年2月  
核燃料サイクル開発機構  
国際技術センター

### ナトリウム基礎実験専門コース

- ◆第1講：ナトリウム一般
- ◆第2講：冷却材としてのナトリウムの特長
- ◆第3講：ナトリウムの化学的性質
- ◆第4講：ナトリウムの物理的性質
- ◆第5講：ナトリウムの核的性質
- ◆第6講：ナトリウムによる材料の腐食
- ◆第7講：ナトリウムの純度管理
- ◆第8講：ナトリウムの貯蔵と輸送
- ◆第9講：ナトリウム取扱関連法規

## 第1講 の目標

本研修は、「もんじゅ」の運転・保守に携わる者、または実際にナトリウム取扱業務に従事する者として習得しておくべきナトリウムに関する専門的技術事項を、座学、実習を通して習熟することを目的としたコースである。

内容的には次の事項に関する習熟を目的とする。

- ☆ナトリウムの一般事項と冷却材としての特長
- ☆化学的性質と物理的諸性質の論理的な把握と実験実習による体得
- ☆ナトリウムの核的性質
- ☆ナトリウムの純度管理に関する不純物と管理基準の設計指針
- ☆ナトリウムによる材料腐食のメカニズム
- ☆ナトリウムの貯蔵と運搬の仕方
- ☆主要なナトリウム取扱関連法規

なお、ナトリウムの危険性、人体への影響、応急処置、防護具、消火等の事項については、別途開催する「ナトリウム消火訓練コース」において学習する。

2

## 第1講 ナトリウム一般

- ◆ナトリウム(Sodium:Na)は、原子番号11、原子量22.99の元素で、周期律表1A族であるアルカリ金属群に属し地球上で6番目に多く存在する。  
【参考資料1-1、1-2: 元素周期表と元素の存在量】
- ◆ナトリウムは、アルカリ金属に属するリチウム、カリウム、ルビジウム、セシウムなどと同様に軽くて軟らかい銀白色の金属で非常に化学反応性に富んでいる。
- ◆ナトリウムは天然には単独で存在せず他の元素、他の化合物と反応した形で存在する。
- ◆金属ナトリウムは1807年に英国Davyが苛性ソーダ\*電解電流実験の際に発見した。工業的生産方法としては、苛性ソーダを電解する「カストナー法」と食塩を直接電解する「ダウンズ法」とがあるが、近年は「ダウンズ法」による製造の方が一般的に用いられている。

### ◎苛性ソーダ(水酸化ナトリウム)

一般にナトリウムやナトリウムを含むアルカリ性の化合物のことをソーダと言う。色々なソーダ製品が化学工業で利用されており、その代表的なものが苛性ソーダである。苛性ソーダとは塩の溶液を電気分解して作られる水酸化ナトリウム(NaOH)のことで洗剤や薬、衣料品など様々な製品を作り出す基礎原料として使われる。

3

参考資料1-1

元素の周期表(長周期型)

n	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A		8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0	
1	<b>H</b> 1.00																<b>He</b> 0.00 4.00	
2	<b>Li</b> 6.94	<b>Be</b> 9.01															<b>Ne</b> 10.00	
3	<b>Na</b> 22.99	<b>Mg</b> 24.31															<b>F</b> 19.00	
4	<b>K</b> 39.09	<b>Ca</b> 40.08	<b>Sc</b> 44.96	<b>Ti</b> 47.88	<b>V</b> 50.94	<b>Cr</b> 52.00	<b>Mn</b> 54.94	<b>Fe</b> 55.85	<b>Co</b> 58.93	<b>Ni</b> 58.73	<b>Cu</b> 63.55	<b>Zn</b> 65.39	<b>Ga</b> 69.72	<b>Ge</b> 71.95	<b>As</b> 74.92	<b>Se</b> 74.96	<b>Br</b> 79.90	<b>Kr</b> 83.78 84.80
5	<b>Rb</b> 84.97	<b>Sr</b> 87.62	<b>Y</b> 88.91	<b>Zr</b> 89.91	<b>Nb</b> 92.91	<b>Mo</b> 95.94	<b>Tc</b> (91)	<b>Ru</b> 101.1	<b>Rh</b> 102.9	<b>Pd</b> 106.4	<b>Ag</b> 107.9	<b>Cd</b> 112.4	<b>In</b> 114.5	<b>Sn</b> 115.7	<b>Sb</b> 121.8	<b>Te</b> 127.6	<b>At</b> (219)	<b>Xe</b> (131)
6	<b>Cs</b> 132.91	<b>Ba</b> 137.32	<b>Hf</b> 178.5	<b>Ta</b> 180.9	<b>W</b> 183.9	<b>Re</b> 186.2	<b>Os</b> 190.2	<b>Ir</b> 192.2	<b>Pt</b> 195.1	<b>Au</b> 196.9	<b>Hg</b> 204.4	<b>Tl</b> 204.5	<b>Pb</b> 207.2	<b>Bi</b> 210.0	<b>Po</b> (210)	<b>At</b> (219)	<b>Rn</b> (222)	
7	<b>Fr</b> (223)	<b>Ra</b> (226)	<b>Ac</b> (227)															

■は非金属元素 ■は金属元素 ■は遷移元素

**ナトリウム**  
**23Na<sub>11</sub>**

【元素の周期表】

出典: 不思議と分るナトリウム、P4、日本原子力文化振興財団

4

参考資料1-2

【元素の存在量】

- ① O(酸素) : 49.4%
- ② Si(珪素) : 25.8%
- ③ Al(アルミニウム) : 7.6%
- ④ Fe(鉄) : 4.7%
- ⑤ Ca(カルシウム) : 3.4%
- ⑥ Na(ナトリウム) : 2.6%
- その他 H(水素) : 0.9%
- N(窒素) : 0.03%

注)大気、海、地殻(16km)における数値

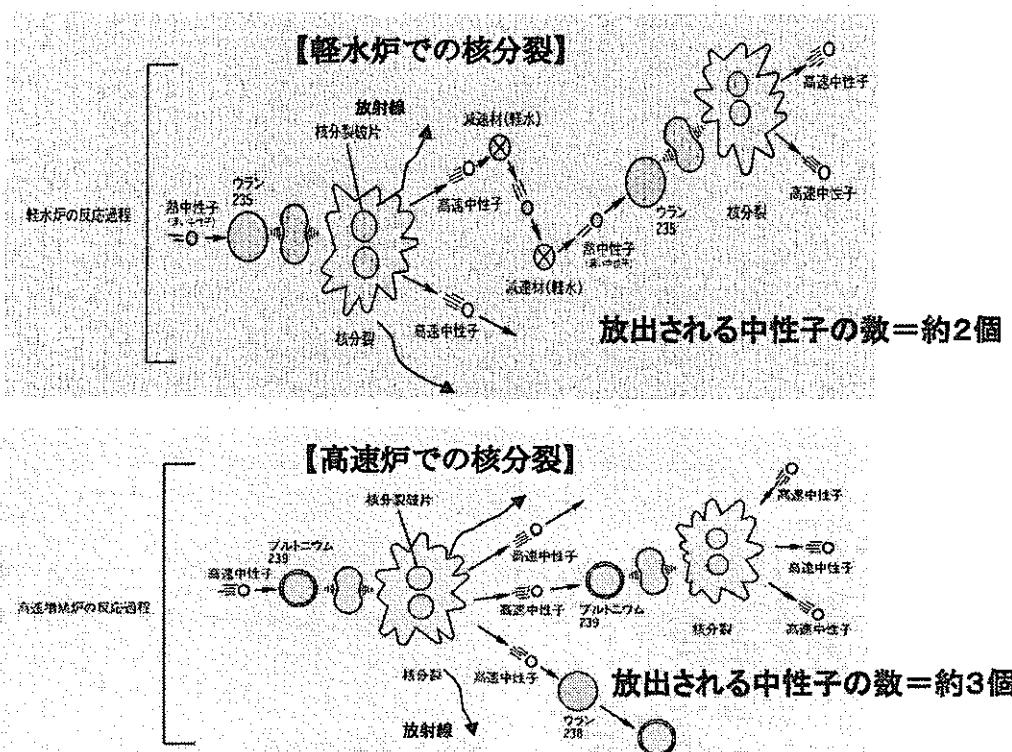
出典: 元素の辞典(1994年版、朝倉書店)

5

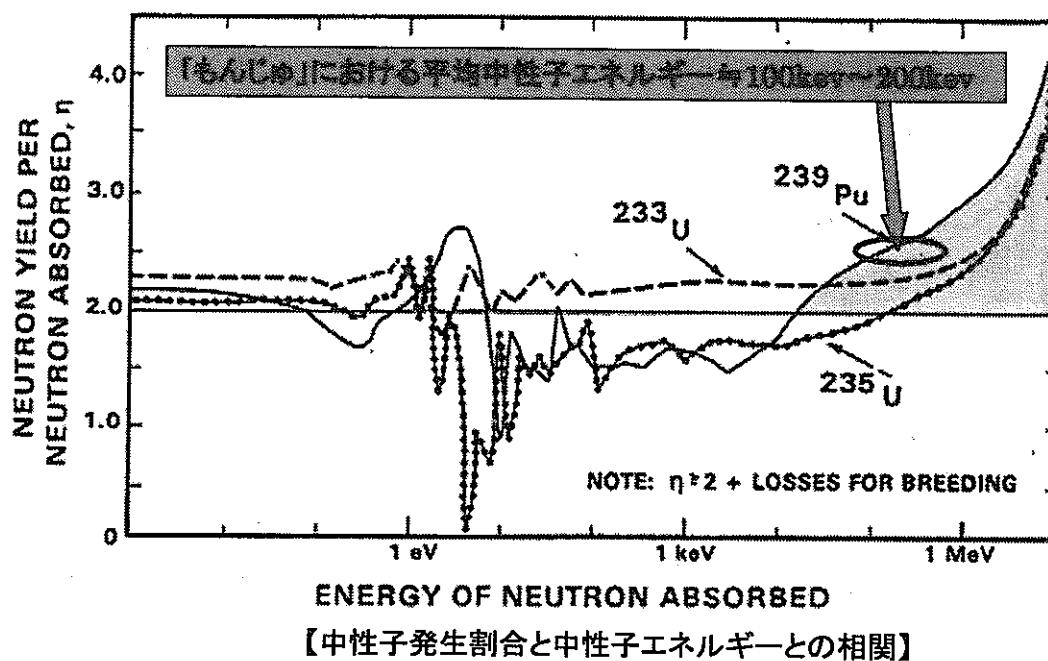
## 第2講 冷却材としてのナトリウムの特長

- ①高遼中性子とプルトニウムの組合せによる核分裂は熱中性子とウランによる核分裂より多くの中性子を発生することができる。ナトリウムは質量数が中性子に比べて約23倍大きいので中性子エネルギーを余り低減(減速)しない。  
【参考資料2-1: 中性子発生割合と中性子エネルギーとの相関】
  - ②高エネルギー領域での中性子捕獲断面積が大きくな。(中性子吸収が少ない)  
【参考資料2-2: ナトリウムの中性子捕獲断面積】
  - ③熱伝導率及び熱伝達率に優れているので、熱効率の高い原子炉運転を行うことができる。【参考資料2-3参照】
  - ④融点が低く(97.8°C)、沸点が高い(881.5°C)ので広い温度範囲内において単一相(液体)で存在できる。
    - ➡ 軽水炉では、冷却材の沸点を高めるために加圧(例:PWR=130気圧程度、BWR=60気圧程度)を必要とするが、FBRではナトリウムの沸点が高いことから加圧の必要がない。これにより、機器を薄肉構造にできることから熱過渡に対する設計が楽になる他、プラントの運転が容易である。【参考資料2-4参照】
    - ➡ 広範囲の温度に渡って冷却材が単一相(液体)であるので、自然循環力による崩壊熱除去がより容易となり、原子炉の安全性を高めることができる。
- 【参考資料2-5,6参照】

6



7

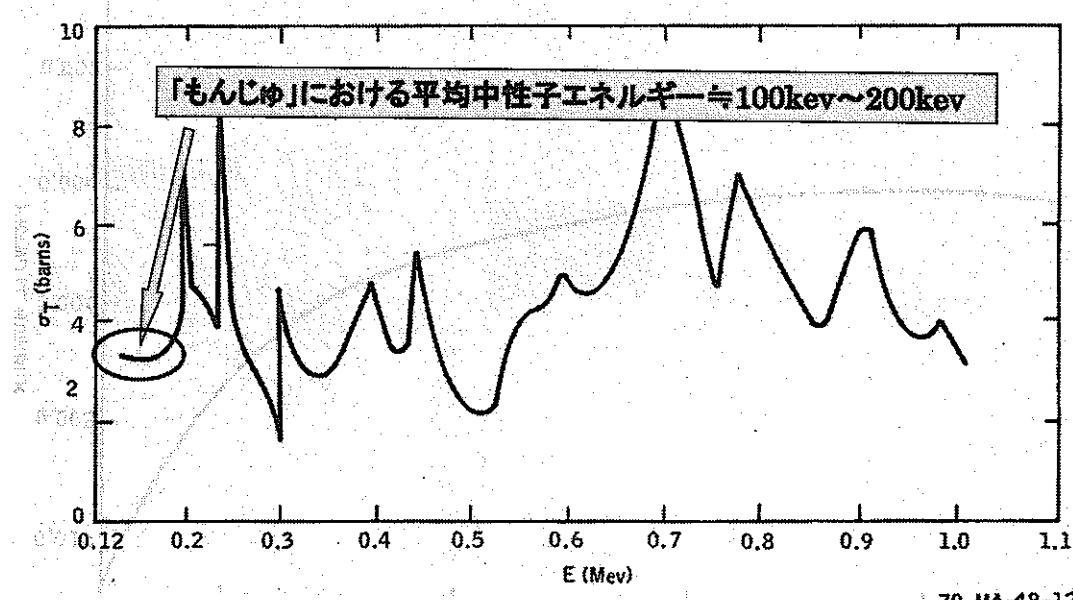


ENERGY OF NEUTRON ABSORBED

【中性子発生割合と中性子エネルギーとの相関】

出典: FBR広報素材資料2版、6-19増殖、平成2年3月

8

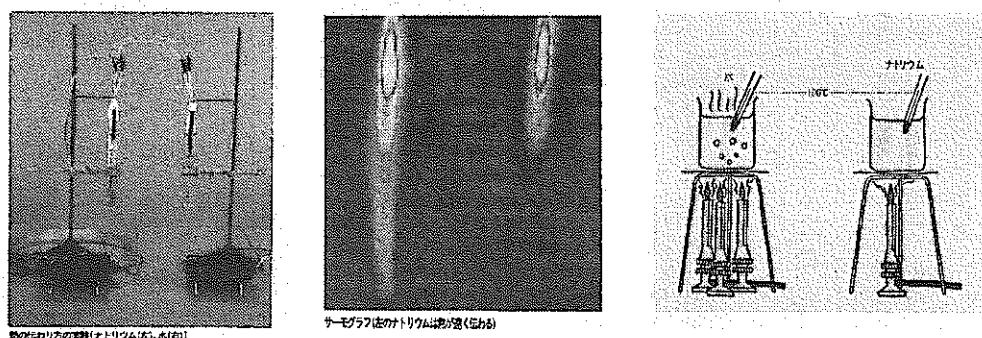


【ナトリウムの中性子捕獲断面積(0.12Mev~1.0Mev)】

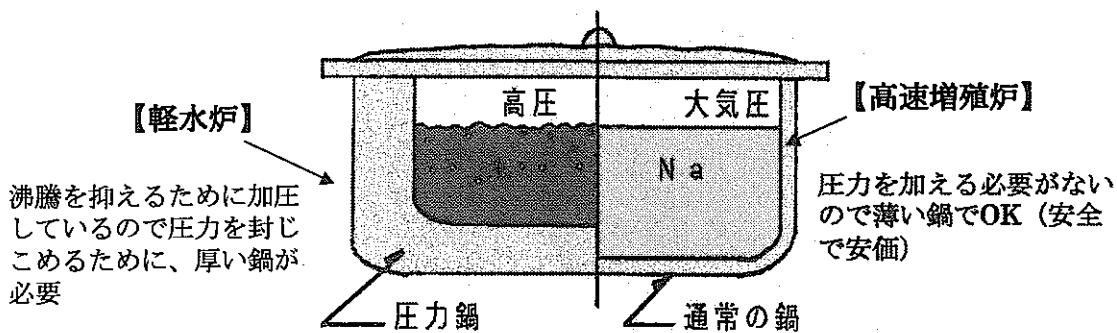
出典: ナトリウム技術読本、「ナトリウムの特性」P1-24、大洗工学センター高速実験炉部、1981年12月

9

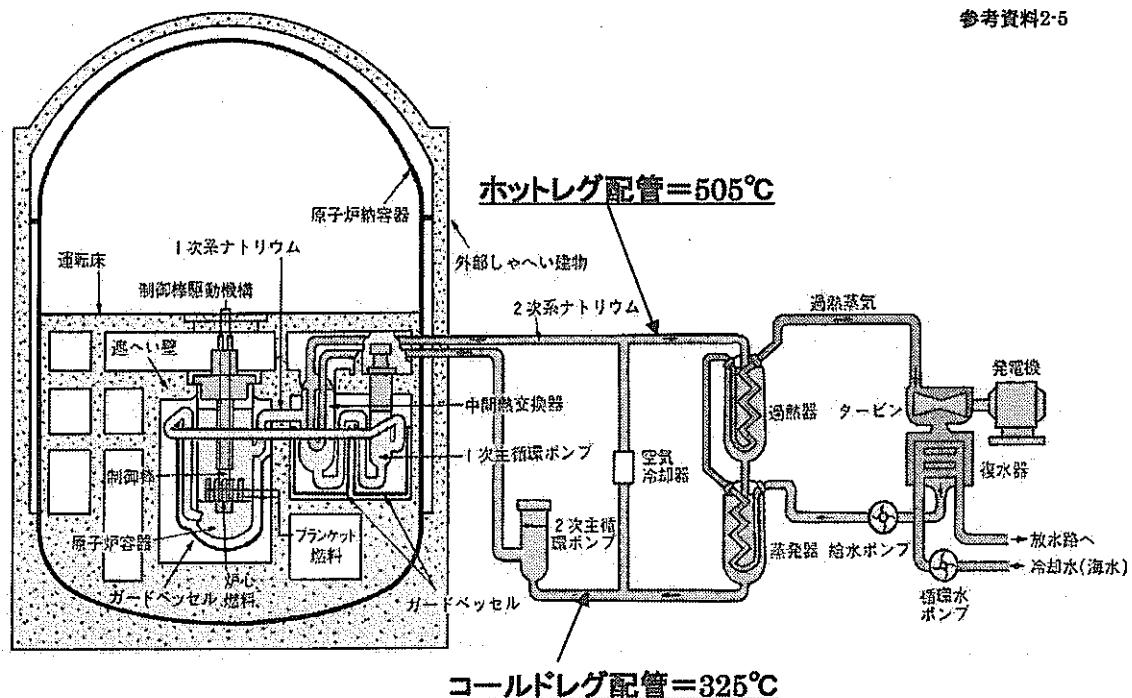
- ナトリウムの「熱伝導率」は水に比べて約100倍である。このことは、水に比べてより沢山の熱を原子炉から取り出せることを表している。
- ◆また、ナトリウムの「比熱」は水の約1/3であり、ナトリウムは水より温めやすい物質である。(少ない熱量で冷却材の温度を高めることができる)
  - ◆以上によりナトリウムを用いると熱効率の高い運転を行うことができる。



【熱の伝わり方の実験】 サーモグラフ(左のナトリウム【ナトリウムは水の約1/3の熱でOK】  
(左:ナトリウム、右:水) は熱が速く伝わっている)

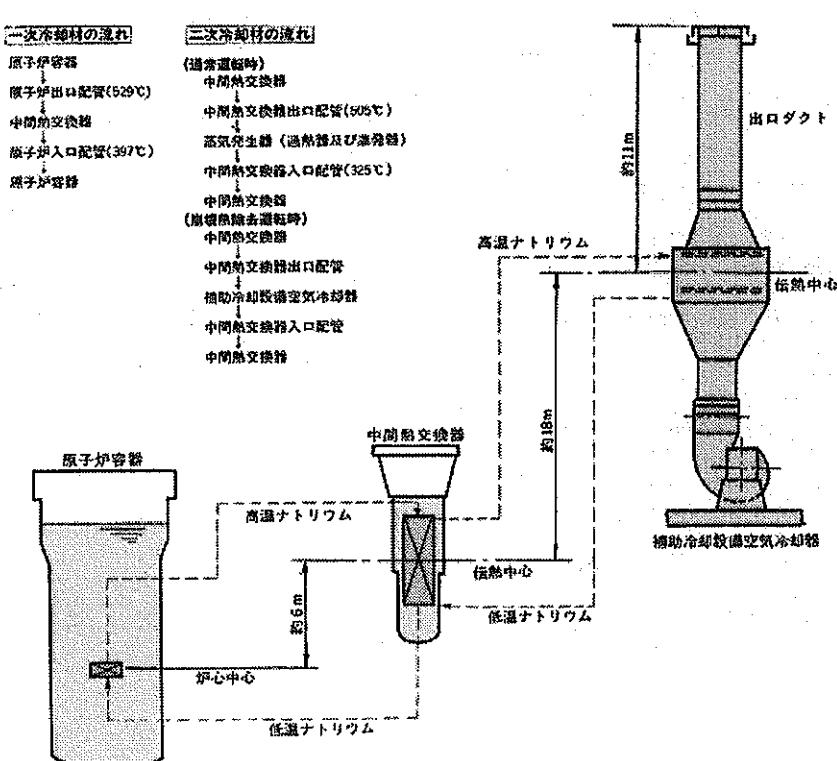


【鍋に例えた場合の軽水炉と高速増殖炉との比較】



【「もんじゅ」主冷却系】

12



【「もんじゅ」補助冷却設備機器配置高低図】

13

⑤ウランやプルトニウム金属を始めとして、殆どの金属材料と共に存性が良い。

➡ 共存性は腐食性と連携したものであり、金属ナトリウムは水に比べると腐食性は弱い。すなわち、放射線源である放射性腐食生成物(CP)発生量を抑制できることにつながり、廃棄物や被爆低減の観点から対策を進め易い。

⑥電気伝導度が大きい。

➡ 電磁ポンプや電磁流量計などの電磁式機器・計器をプラント運転に活用できる。このことは、冷却手段の多様化を図ることによる安全性の向上や、プラント運転の計測・制御を容易に行うことができる事を示す。

⑦比重が軽く、粘性が小さい

➡ ポンプの駆動力が小さくてすみ、軽水炉に比べて冷却材循環ポンプを小型化できる。

⑧資源が豊富

➡ 比較的安価である。

14

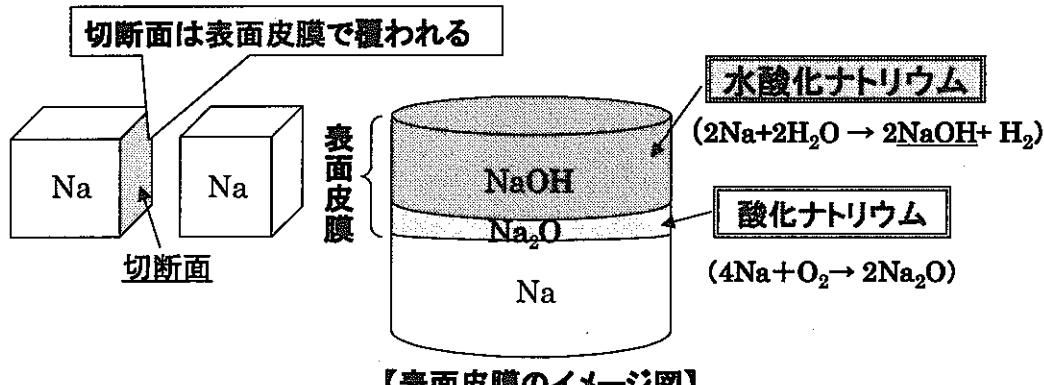
### 第3講 ナトリウムの化学的性質

#### 3.1 固体ナトリウム-空気との反応

◆ 固体ナトリウムが空気に触れると、空気中の酸素や水分などと反応して表面皮膜を形成するので急激な反応は生じない。

◆ 表面皮膜の主たる成分は水酸化ナトリウムであると言われ、ナトリウム表面には薄い酸化ナトリウム\*の膜が形成されていると考えらる。

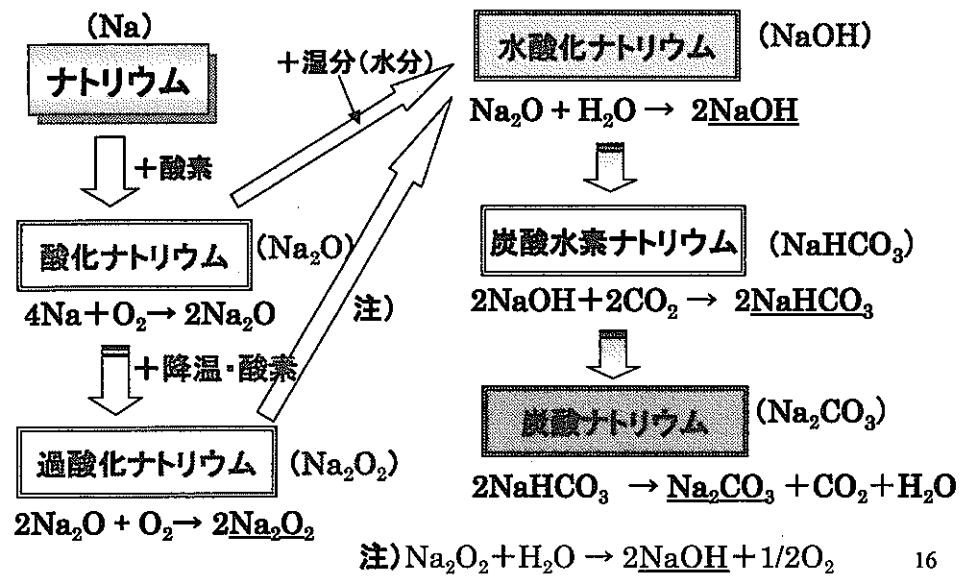
\* 時間が経てば、酸化ナトリウムは湿気を吸って水酸化ナトリウムに変わってゆく。



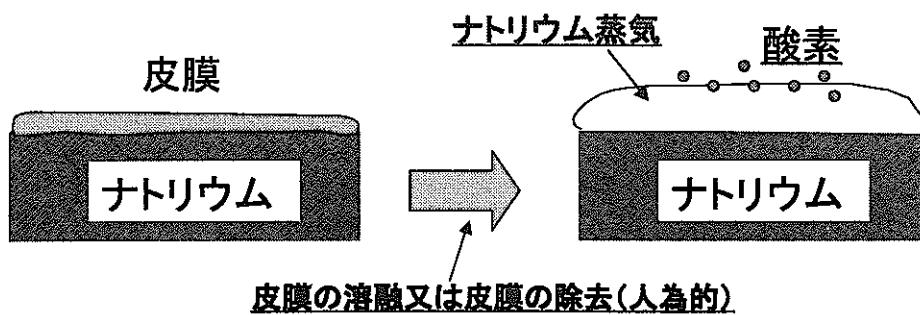
15

### 3.2 ナトリウム燃焼時の反応

- ◆ナトリウムを加熱すると約300°C前後で皮膜が破れるため、ナトリウム蒸気が空気中に飛び出す。ナトリウム蒸気は空気中の酸素と混ざって可燃性混合気体を形成し、ナトリウムが保有する熱によって混合気体が燃焼し始める(発火)。
- ◆ナトリウムが燃焼すると次のような過程を経て、酸化ナトリウム、過酸化ナトリウム、水酸化ナトリウム(腐食性が強いアルカリ物質)などの燃焼物を生じる。



16



【ナトリウム燃焼に至るメカニズムイメージ図】

17

## 【ナトリウム燃焼物の特徴】

$(\text{Na}_2\text{O})$	$(\text{Na}_2\text{O}_2)$
酸化ナトリウム	過酸化ナトリウム
<ul style="list-style-type: none"> <li>・白色(不純物混在:褐色又は灰色)、脱水剤</li> <li>・強い刺激臭、人体に有害*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・淡黄色(加熱:黄褐色)、漂白剤</li> <li>・強い刺激臭、人体に有害*</li> </ul>
$(\text{NaOH})$	
水酸化ナトリウム	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・毒劇物、白色で吸湿性が強く潮解性</li> <li>・水と反応して多量の熱を発生</li> </ul>	* 加水分解して水酸化ナトリウムを形成
$(\text{Na}_2\text{CO}_3)$	
炭酸ナトリウム	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・温泉、岩塩など天然に多く存在(化学的に安定)</li> <li>・吸湿性強くナトリウム消火剤として使用</li> </ul>	

18

## 【エアロゾルに対する1次系と2次系での安全性の比較】

1次冷却材ナトリウム		2次冷却材ナトリウム
放 射 性	有	無
排 気、配 管 設 施 室 の ガス	窒素(露点濃度2%以下)	空 气
ナトリウム エアロゾルの生成量	少 い	多 い <small>ナトリウム燃焼抑制板によりナトリウム エアロゾルの生成は抑制される。</small>
排 气、配 管 設 施 室 の 気 図	鋼製内張りをしているため気密性十分	・床面は鋼製内張りをしている。 ・左記にくらべ気密性は低い。
安 全 性	ナトリウムエアロゾルは放射性物質を含むが、 鋼製内張りの内側に封じ込められる。	・2次ナトリウムが非放射性のため、放射性 物質放出の問題はない。 ・ナトリウムエアロゾル自体が持っている性 質(沈降性等)によって遠赤外へのナトリ ウムエアロゾルの漏えいは制限される。

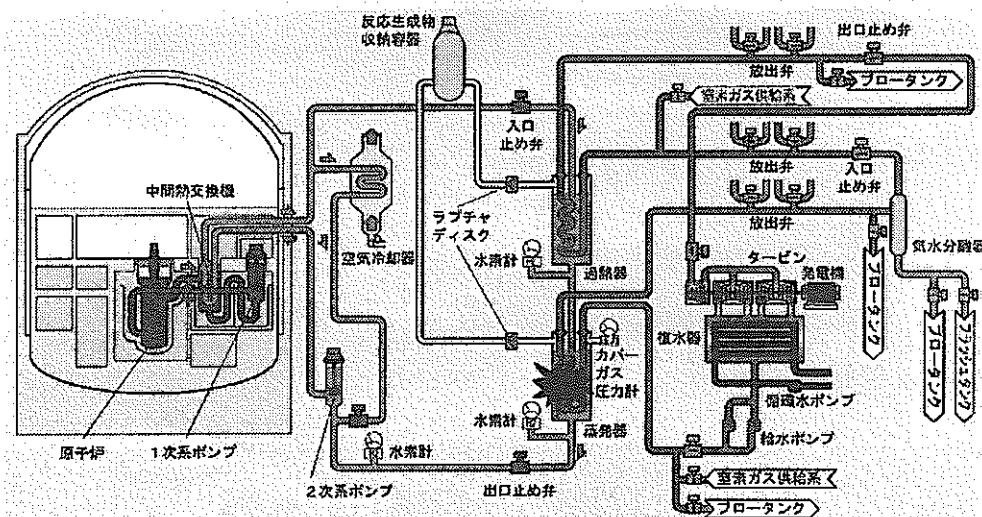
出典:FBR広報素材資料集「ナトリウムエアロゾル」、P12-3、科学技術庁、1990年2月 19

### 3.3 ナトリウムー水との反応

◆ナトリウムと水が反応すると水素ガスと反応熱、そして水酸化ナトリウムを生じる。



◆反応量が多い場合は反応熱によって空気中、不活性ガス中に拘わらず爆発現象が生じる。



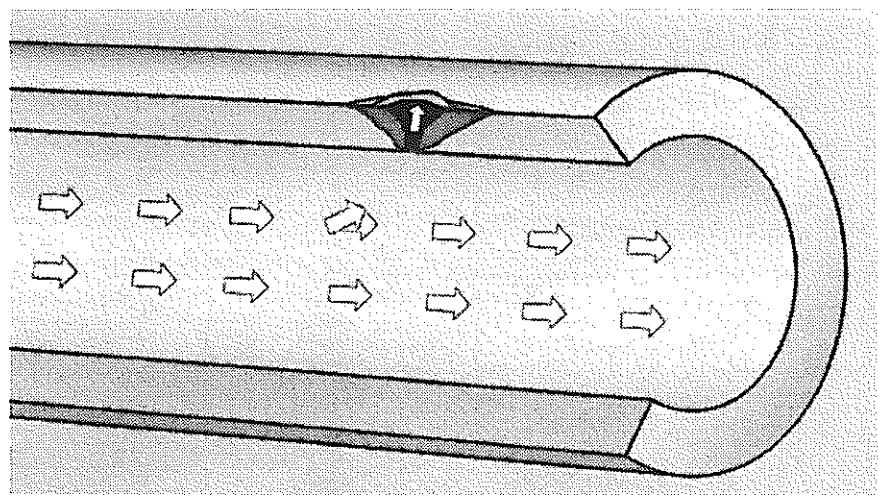
【「もんじゅ」冷却系全体系統図】

20

### 「もんじゅ」におけるナトリウムー水反応事象

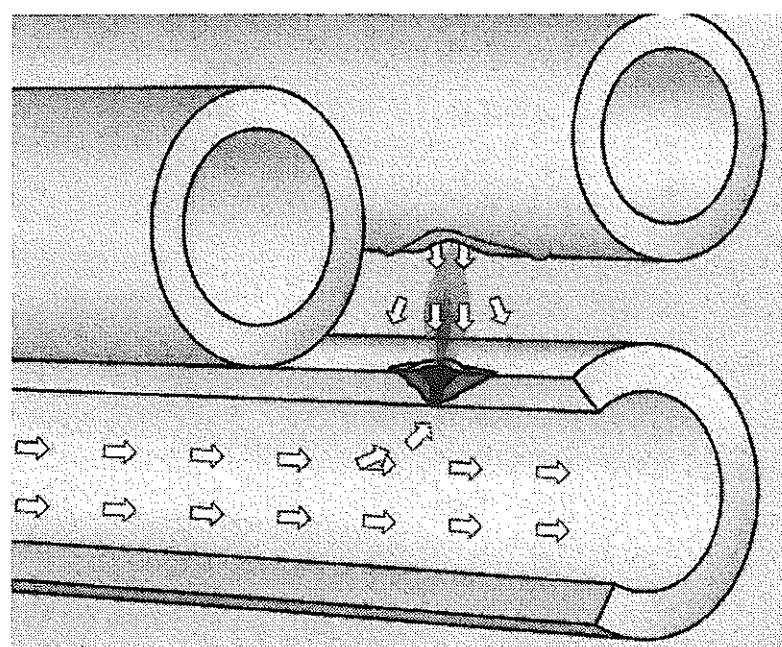
リーク規模	発生現象
微小リーク <0.1 g/sec	「セルフプラグ現象」【参考資料 3-1 参照】 貫通亀裂に入った反応生成物が詰まって亀裂が閉塞してしまう現象
小リーク 0.1~10 g/sec	「ウェステージ現象」【参考資料 3-2 参照】 ろうそくの炎のような Naー水反応により先端部に位置する隣接管は損耗し破損に至る。3~5g/sec のリーク率で最大となり、貫通までの時間は約 20 秒程度である。
中リーク 10~2000g/sec	「高温ラブチャ現象」【参考資料 3-3 参照】 ろうそくの炎の外縁部領域が約 1200°C位まで上昇すると伝熱管の材料強度が急速に減少し、伝熱管内圧によって膨張変形して最終的に破裂に至る。
大リーク > 2000 g/sec	反応境界層に気泡ガスの移動と Na の流入が交互に繰り返す現象が生じるため隣接管への影響はないが、衝撃圧力の伝播及び 2 次冷却系統内の圧力上昇を生じる【参考資料 3-4 参照】

21



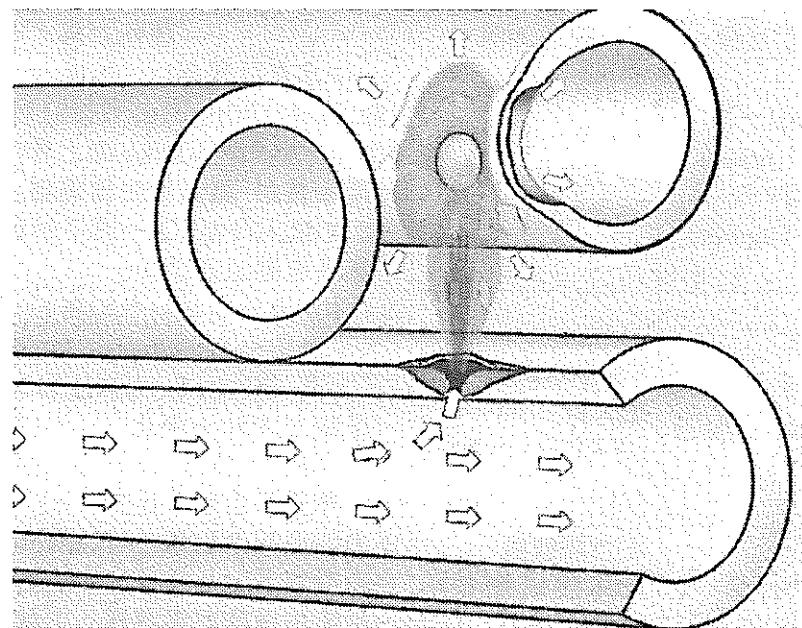
【「セルフプラグ現象」イメージ図】

22



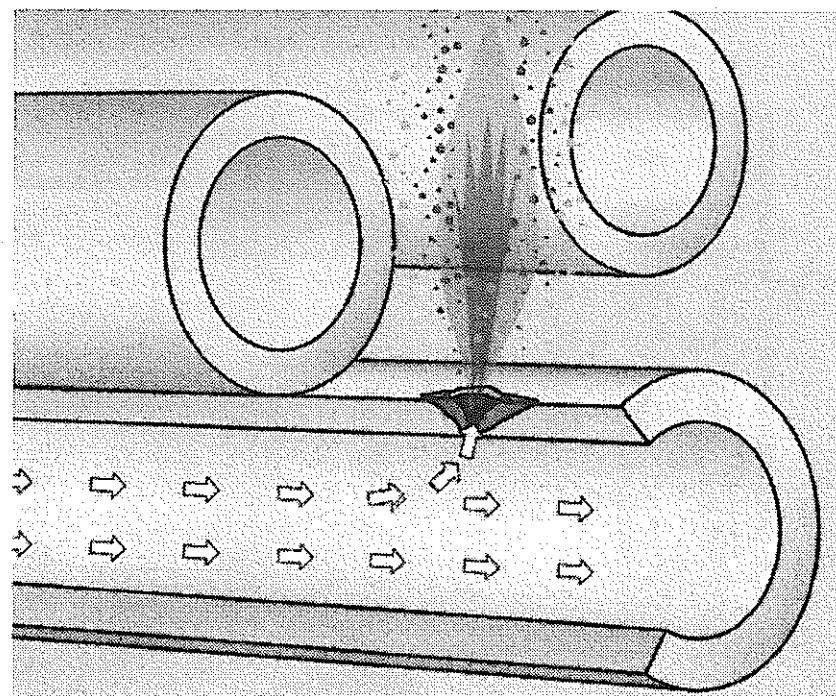
【「ウェステージ現象」イメージ図】

23



【「高温ラプチャ現象」イメージ図】

24



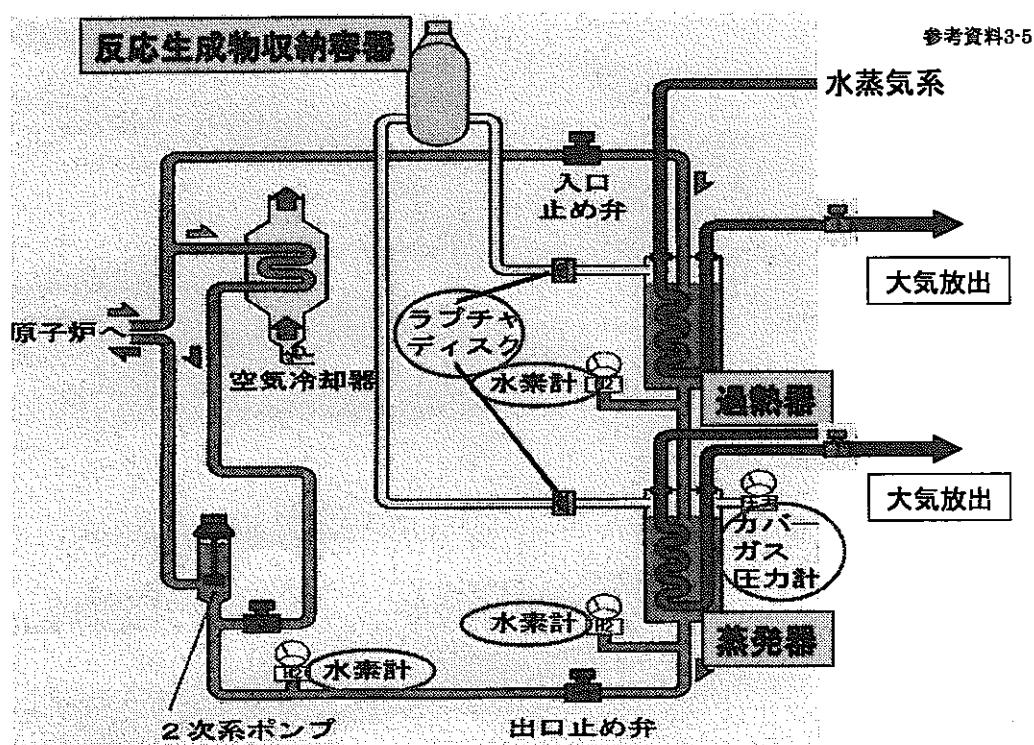
【「大規模リーク」イメージ図】

25

「もんじゅ」ナトリウムー水反応事故に対する運転対応

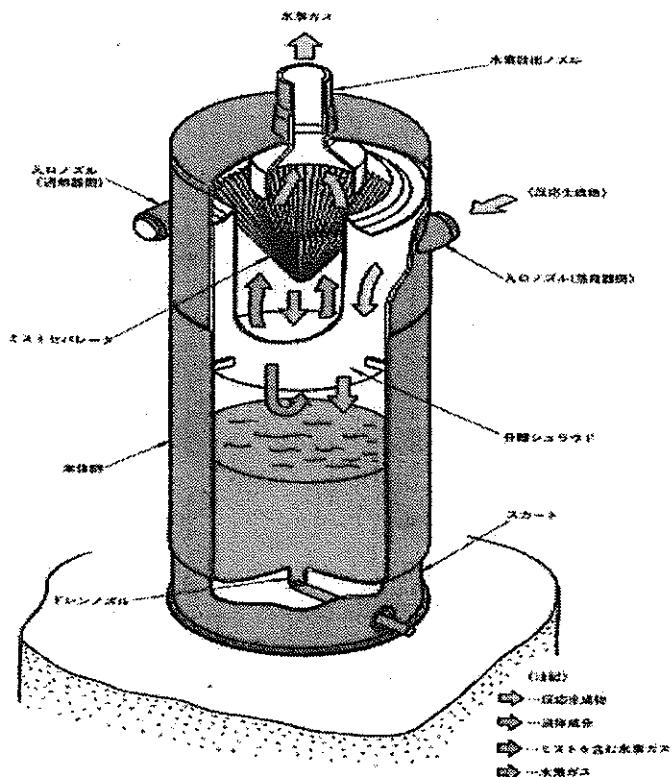
リーク規模	設備対策	運転対応
微小リーク (<0.1 g/sec) 小リーク (0.1~10g/sec)	Na 中水素計 Ar ガス中水素計 【参考資料 3-5 参照】	Na 中水素計警報レベル低 or 中の場合 (低: B.G(170ppb)の 6.5%) (中: 150ppb/60min の上昇率) →運転員が「蒸気発生器隔離」釦を手動 ON →2次ポンプトリップ→原子炉自動停止、水蒸気系自動急速プローチ
中リーク (10~2000g/sec)	Na 中水素計 圧力計 【参考資料 3-5 参照】	Na 中水素計警報レベル高 or 圧力高の場合 (水素計警報高: 30ppb/10min の上昇率) (圧力高: SG カバーガス圧力 > 0.17Mpa) →自動でプラント停止 (2次ポンプトリップ→原子炉自動停止、水蒸気系自動急速プローチ)
大リーク <td>圧力開放板 反応生成物収納容器 【参考資料 3-6 参照】</td> <td>圧力開放板の破裂(&gt;0.3Mpa) →自動でプラント停止、系統圧力の降圧 →反応生成物収納容器への移行 (反応生成物と水素ガスの分離、ガス燃焼)</td>	圧力開放板 反応生成物収納容器 【参考資料 3-6 参照】	圧力開放板の破裂(>0.3Mpa) →自動でプラント停止、系統圧力の降圧 →反応生成物収納容器への移行 (反応生成物と水素ガスの分離、ガス燃焼)

26



【「もんじゅ」ナトリウムー水反応事故に対する設備対策】

27



【ナトリウムー水反応生成物収納容器】

28

【高速炉(蒸気発生器)でのナトリウムー水反応事故例】

ナトリウムー水反応事故は、過去、世界的には十数回生じている。最も大規模な事故が1987年英国PFRで生じた事故であるが、これは破損検出設備の不良(水素計)や設備対応が不十分(高圧蒸気の急速排出系が設備されていない)であつたことに起因した事故であり、大規模なナトリウムー水反応は十分に防ぐことが可能である。

【参考資料3-7:ナトリウムー水反応事故例】

29

表 ナトリウムー水反応事故例(2/2)

プラント名	国名	発生年月	事 故 概 要
BN-350	カザフスタン	1992年1月	運転中に予熱ヒータの絶縁抵抗低下検出方式のナトリウム漏洩検知器が作動し、運転員が現場確認を行ったところ、部屋に白煙が充満していた(視界 20~30cm)。非常用換気装置による排煙を行った後、再熱器と蒸発器のカバーガス均圧配管からの漏洩が確認された。
PFR	英 国	1974年 ~1979年	1974年から1975年に蒸発器2基で合計12回の小リーク、1979年には他の蒸発器でも発生。1974年から1975年に過熱器2基で同様の小リーク発生。1976年に再熱器1基で小リークが発生した。原因はいずれも製作時の溶接不良または施工法の不適切(残留応力除去を実施していない等)により、溶接部き裂が進展・貫通したと推定されている。
BN-600	ロシア	1980年6月 ~10月	過熱器と再熱器で数回発生した。6月の水漏洩時には、漏洩検出器の整備が十分でなかったこと、並びに運転上の対応遅れ(異常検知から隔離まで1週間)により、伝熱管10本が破損した。漏洩の原因是、伝熱管と管板との溶接部の製造時の微小欠陥が運転中に成長・拡大したものとされている。
Phenix	仏 国	1982年4月、12月 1983年2月、3月	蒸気発生器再熱部伝熱管から水漏洩し、Na <sup>+</sup> -水反応を起こした。最初の漏洩時には、蒸気側の隔離後、伝熱管への窒素ガス注入系が正常に作動せず、蒸気側へのナトリウム流入が起こった。原因は、起動運転時にタービンバイパス系を使用するが、その際に少量の水が再熱部に侵入し、肉厚が厚くなっている当該溶接部において生じた大きな繰り返し熱応力(熱疲労)によりき裂に至ったものと推定されている。
PFR	英 国	1987年2月	全出力運転中に過熱器の伝熱管で小規模な水漏洩に続いて大規模な水漏洩が発生した。ナトリウム入口流路を形成する内筒は、6枚の曲板が重ね合されて円筒状に組み立てられている。運転中に重ね合せ部のギャップが拡大し、内筒から管束部への流れが増加し、伝熱管の流体振動により減肉が起こり、1本の伝熱管にき裂が生じて小規模な水漏洩が生じ、水漏洩検出系が故障していたためにこの時点ではプラントは停止されず、周辺の伝熱管39本が破損した。また、高圧蒸気の急速排出系が設置されていなかったために、損傷が周辺の70本まで拡大した。

30

表 ナトリウムー水反応事故例(1/2)

プラント名	国名	発生年月	事 故 概 要
BR-5	ロシア	1960年8月 ~10月	・冷却水中の塩素の存在下での温度・圧力の変動によるステンレス鋼の粒界腐食割れで8本の2重管型伝熱管の内管にき裂が発生した。(8~9月) ・製作時の損傷に起因して伝熱管外管が破損し、2重管部伝熱媒体である水銀が2次冷却材(NaK)中に多量に混入した。(10月)
E.Fermi	米 国	1962年6月 12月	・製作時の腐食性の強い洗浄液の残留、加工時の残留応力、及び伝熱管が一時的に高温にさらされたことにより1本の伝熱管で応力腐食割れが発生した。(6月) ・伝熱管の流体振動により、合計48本の伝熱管が破損し、Na <sup>+</sup> -水反応を起こした。また、水漏洩検出系の検出精度が不十分であったことが示されている。(12月)
EBR-II	米 国	1965年2月	二重管型伝熱管の内管と水側管板の溶接部の溶接欠陥により、2重管間隙部に水が存在していることが検出された。(原子炉停止中)
BN-350	カザフスタン	1973年 ~1975年	バヨネット型蒸発器(伝熱管材料: 1Cr-2Mo鋼)の3つのユニットで5回の小漏洩、2つのユニットで大漏洩を起こした。原因はいずれも伝熱管下部鏡板溶接部の欠陥であり、製作時の品質管理の不備であったとされている。
"	"	1975年2月	蒸発器で大規模なナトリウム-水反応が発生(816本中123本の伝熱管破損)、ラブチャーディスク作動、ナトリウムはドレンされたが、一部ドレン配管中に残留していた。同時に水系のオーバーフロー配管も破損したため、水-水蒸気がナトリウム系に入り、残留ナトリウムと反応した。反応生成物が高温下で配管を腐蝕し、2箇所に穴を開けた。この穴から水素とナトリウムが漏洩し、水素ガスは噴出しながら燃焼した。回収量は約300kg。
BN-350	カザフスタン	1977年10月	ナトリウム-水反応によるナトリウム酸化物で液位計タンクが満たされ、純化できなかったため、蒸発器のナトリウム液位を下げて交換工事を行った。下部配管を切断したところ、切断口からナトリウムが漏洩して燃焼した。漏洩量約30kg。
"	"	1989年1月	水素計により蒸気発生器の水漏洩が検知され、原子炉停止、2次系及び水系の緊急ドレンが行われたが、この過程で反応ジェットによりモジュラーの胴部に穴が空き、ナトリウムが漏洩・燃焼した。この燃焼は保護カバー内に窒素ガスを注入することで迅速に消火されたが、カバー底部の漏洩ナトリウム回収タンクへのドレン口の溶融膜(ナトリウムの温度で溶融)が作業用の鉄板で覆われていたため、ナトリウムが底部に溜まり、保護カバーの隙間から外に漏れだし、燃焼した。

【出典:FBR広報素材資料集2班、57高速増殖炉のトラブルと事故、原文振、1990年3月】31

### 3.4 ナトリウムとその他の反応

#### (1) コンクリートとの反応

- ◆液体ナトリウムがコンクリートに接触すると、コンクリート中の水分あるいは化学物質と反応し、表面に害を与えたる、コンクリート強度に影響を与える。特にナトリウムが高温で放出されるような場合には破壊に至る恐れがある。これは安全設計において考慮すべき重要事項である。
- ◆高温のナトリウムがコンクリートに接触すると、コンクリートの温度は水の沸点100°Cをすぐに超え、金属ナトリウムとコンクリート構成材料との間で生じる付加的化学反応や水分放出によってコンクリートのひび割れが生じる。
- ◆このように、ナトリウムがこぼれる恐れがある場合には、コンクリートを露出したままで使用するのは安全設計上許されないことであり、そのためにプラントには床ライナーあるいは受け皿、壁板等が設備されている。

#### (2) 保温材との反応

液体金属を取り扱うプラントには、系統、機器、施設の保温のために多量の保温材が使用されている。これらの保温材には、ナトリウムと反応しないような材質(例えば無水性のケイ酸塩カルシウム、グラスウールなど)が選択されており、ナトリウム漏洩時の災害拡大につながらないように工夫されている。

32

## 第4講 ナトリウムの物理的性質

本講では、ナトリウム物性のうち、プラント設計において馴染みの深いものを対象として紹介する。

### 4.1 力学的性質

#### ① 密度

ナトリウムの密度は温度に依存して変化する。固体ナトリウム及び液体ナトリウムの密度は、それぞれ次の実験式によって与えられる。

$$\begin{aligned} \cdot (\text{固体ナトリウム}) \dots & \rho = 0.9725 - 20.11 \times 10^{-5}t - 1.5 \times 10^{-7}t^2 (\text{g/cm}^3) \\ \cdot (\text{液体ナトリウム}) \dots & \rho = 0.9501 - 2.2976 \times 10^{-4}t - 1.460 \times 10^{-8}t^2 + 5.638 \\ & \quad \times 10^{-12}t^3 (\text{g/cm}^3) \end{aligned}$$

ここで  $98^\circ\text{C} \leq t \leq 1370^\circ\text{C}$

【参考資料4-1,4-2:液体ナトリウムの密度の温度依存性(表とグラフ)】

#### ② 粘性

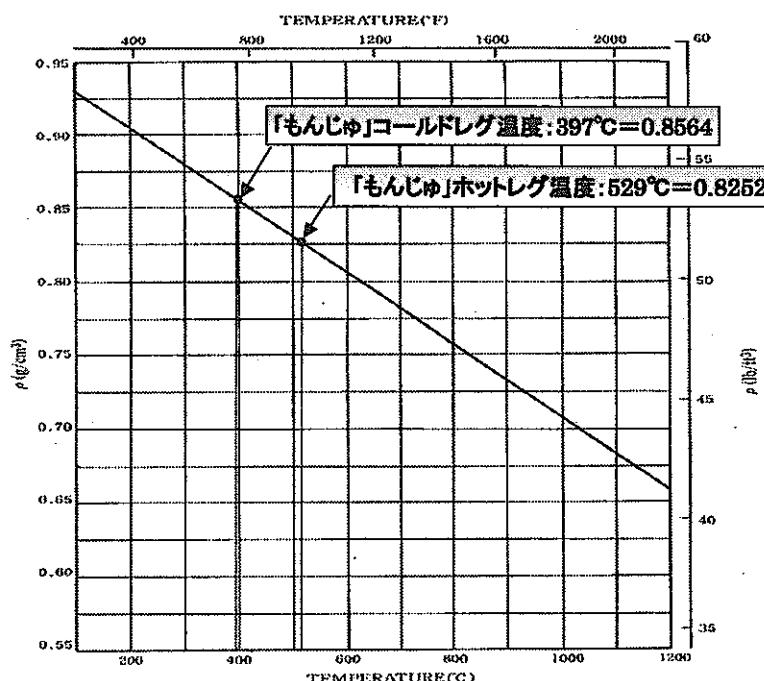
流体の粘性係数とは流体のせん断力或いはねじり変形に対する抵抗の尺度で、流れに対する抵抗として現れる。すなわち、粘性係数とは、流れ易さを表す尺度である。絶対粘性係数  $\eta$  は次のように定義される。

33

表 液体ナトリウムの密度の温度依存性

Temperature		Liquid sodium	
°C	°F	g/cm <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>
50	122		
100	212	0.9269	57.87
150	302	0.9153	57.14
200	392	0.9036	56.41
250	482	0.8918	55.68
300	572	0.8800	54.94
350	662	0.8681	54.20
400	752	0.8562	53.45
450	842	0.8442	52.71
500	932	0.8322	51.99
550	1,022	0.8202	51.21
600	1,112	0.8082	50.45
650	1,202	0.7961	49.70
700	1,292	0.7840	48.95
750	1,382	0.7719	48.19
800	1,472	0.7598	47.43
850	1,562	0.7477	46.68
900	1,652	0.7350	45.93
950	1,742	0.7234	45.17
1,000	1,832	0.7113	44.41
1,050	1,922	0.6992	43.65
1,100	2,012	0.6872	42.90
1,150	2,102	0.6751	42.15
1,200	2,192	0.6631	41.40
1,250	2,282	0.6511	40.64
1,300	2,372	0.6391	39.90
1,350	2,462	0.6272	39.15
1,400	2,552	0.6151	38.40
1,450	2,642	0.6030	37.65
1,500	2,732	0.5909	36.90
1,550	2,822	0.5788	36.15
1,600	2,912	0.5667	35.40
1,650	2,952	0.5546	34.65
1,700	3,002	0.5425	33.90
1,750	3,052	0.5304	33.15
1,800	3,102	0.5183	32.40
1,850	3,152	0.5062	31.65
1,900	3,202	0.4941	30.90
1,950	3,252	0.4820	30.15
2,000	3,302	0.4700	29.40
		Extrapolated	
		0.4579	28.64
		0.4458	27.89
		0.4337	27.14
		0.4216	26.39
		0.4095	25.64
		0.3974	24.89
		0.3853	24.14
		0.3732	23.39
		0.3611	22.64
		0.3490	21.89
		0.3369	21.14
		0.3248	20.39
		0.3127	19.64
		0.3006	18.89
		0.2885	18.14
		0.2764	17.39
		0.2643	16.64
		0.2522	15.89
		0.2401	15.14
		0.2280	14.39
		0.2159	13.64
		0.2038	12.89
		0.1917	12.14
		0.1796	11.39
		0.1675	10.64
		0.1554	9.89
		0.1433	9.14
		0.1312	8.39
		0.1191	7.64
		0.1070	6.89
		0.0949	6.14
		0.0828	5.39
		0.0707	4.64
		0.0586	3.89
		0.0465	3.14
		0.0344	2.39
		0.0223	1.64
		0.0102	0.89
		-0.0081	-0.14

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術読本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-60 1991年7月 34



液体ナトリウムの密度の温度依存性

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術読本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-70 1991年7月 35

$$\eta = \frac{F/A}{u/h} \text{ (kg·sec/m}^2\text{又はkg*/cm·sec(ポアズ))}$$

ここで、 F/A:せん断応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

u:速度 (m/sec)、h:距離 (m)

kg\*:質量

絶対粘性係数  $\eta$  を密度で除したものを動粘性係数  $\nu$  と称する。

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ (m}^2/\text{sec又はストークス)}$$

絶対粘性係数の圧力依存性は無視できるので温度依存性だけが問題となる。通常、絶対粘性係数  $\eta$  はセンチポアズで、動粘性係数  $\nu$  に対してはセンチストークスの単位が用いられる。

(500°C以下の場合)

$$\eta = (0.1235 \pm 0.0018) \rho^{1/3} \exp[(697 \pm 9) \rho/T]$$

但し、標準偏差  $\sigma = 0.0065$  センチポアズ

(500°C以上の場合)

$$\eta = (0.0851 \pm 0.0013) \rho^{1/3} \exp[(1040 \pm 19) \rho/T]$$

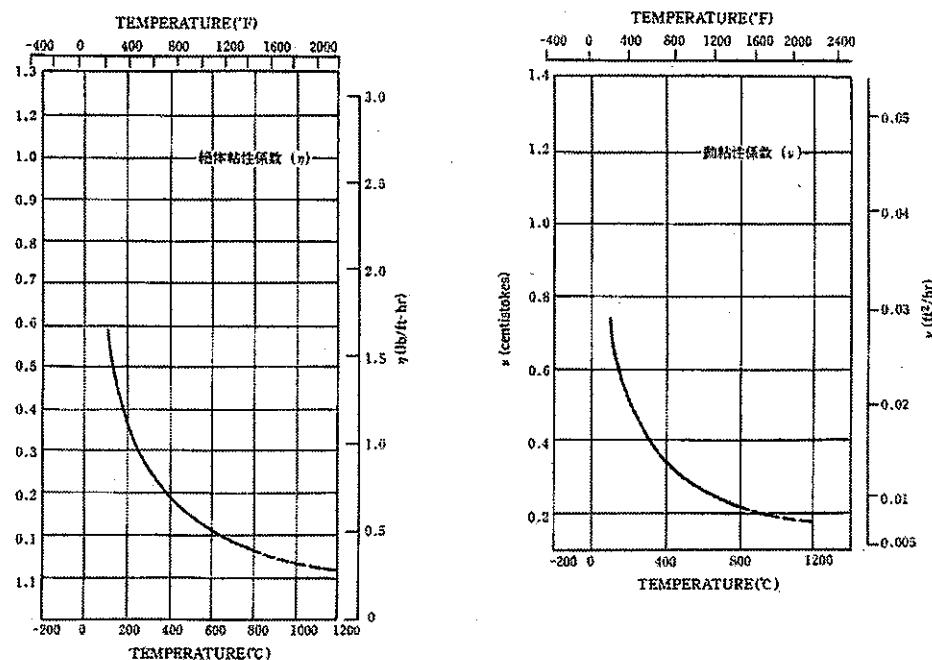
但し、標準偏差  $\sigma = 0.0035$  センチポアズ

【参考資料4-3,4-4:液体ナトリウムの絶対粘性係数と動粘性係数(表とグラフ)】

参考資料4-3

表 液体ナトリウムの絶対粘性係数と動粘性係数

絶対粘性係数 ( $\eta$ )				動粘性係数 ( $\nu$ )			
Temperature		Liquid sodium		Temperature		Liquid sodium	
°C	°F	Centipoise	lb/ft·hr	°C	°F	Centipoise	ft <sup>2</sup> /hr
50	122			50	122		
100	212	0.6802	1.6454	100	212	0.7386	0.02643
150	302	0.5415	1.3099	150	302	0.5916	0.02292
200	392	0.4519	1.0922	200	392	0.5001	0.01837
250	482	0.3900	0.9435	250	482	0.4373	0.01694
300	572	0.3459	0.8347	300	572	0.3921	0.01519
350	662	0.3110	0.7525	350	662	0.3583	0.01398
400	752	0.2845	0.6884	400	752	0.3323	0.01287
450	842	0.2633	0.6370	450	842	0.3119	0.01208
500	932	0.2460	0.5950	500	932	0.2955	0.01145
550	1,022	0.2245	0.5431	550	1,022	0.2737	0.01060
600	1,112	0.2075	0.5021	600	1,112	0.2586	0.00995
650	1,202	0.1933	0.4878	650	1,202	0.2429	0.00941
700	1,292	0.1813	0.4837	700	1,292	0.2313	0.00896
750	1,382	0.1710	0.4188	750	1,382	0.2216	0.00859
800	1,472	0.1621	0.3922	800	1,472	0.2134	0.00827
850	1,562	0.1543	0.3733	850	1,562	0.2064	0.00800
900	1,652	0.1474	0.3567	900	1,652	0.2004	0.00776
950	1,742	0.1413	0.3418	950	1,742	0.1959	0.00756
1,000	1,832	0.1358	0.3285	1,000	1,832	0.1909	0.00740
1,050	1,922	0.1308	0.3165	1,050	1,922	0.1871	0.00725
1,100	2,012	0.1263	0.3057	1,100	2,012	0.1838	0.00712
1,150	2,102	0.1222	0.2951	1,150	2,102	0.1811	0.00702
1,200	2,192	0.1185	0.2866	1,200	2,192	0.1787	0.00692



液体ナトリウムの絶対粘性係数と動粘性係数

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-71 1991年7月 38

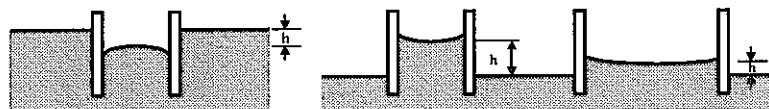
### ③表面張力

全ての液体は凝集力あるいは付着力の性質を有している。毛細管現象は、固体壁上の液体表面を押し下げるか上昇させるが、これは凝集力あるいは付着力の双方によって引き起こされる現象である。

表面張力の測定にとって特に重要なのは何らかの不純物の存在である。これは表面張力を著しく変化させる。液体ナトリウムに対しては次式が推奨されている。

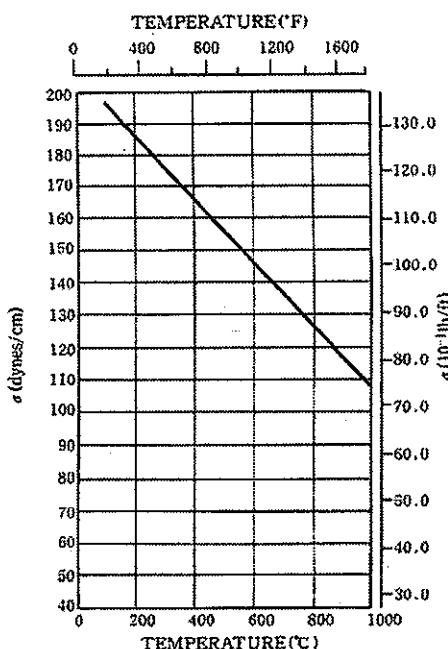
$$\sigma = 206.7 - 0.1T \text{ (ダイン/cm)}$$

### 【参考資料4-5: 液体ナトリウムの表面張力の温度依存性】



### ④濡れ特性

多くの金属は濡れに対して臨界温度を示す。この臨界温度以上ではナトリウムによる濡れが容易に起こるが、それ以下では殆ど濡れ難い。濡れ特性は金属表面の酸化膜とナトリウムとの反応に関連づけられ、ナトリウム中の不純物濃度の影響を受ける。純金属の表面でナトリウム純度が高い場合は直ちに濡れる。



液体ナトリウムの表面張力の温度依存性

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-72 1991年7月 40

## 4.2 熱物理的性質

### ① 融点

1気圧下でのナトリウムの融点は97.82°Cである。

【参考資料4-6:ナトリウムの融点と圧力の関係】

### ② 沸点

1気圧下でのナトリウムの沸点は881.5°Cである。

### ③ 热膨張

温度による線膨張、体積膨張は密度の温度変化の逆数と関連づけられる。

(固体ナトリウムの線膨張)

$$l = l_0 (1 + 6.893 \times 10^{-5} t + 0.63 \times 10^{-7} t^2)$$

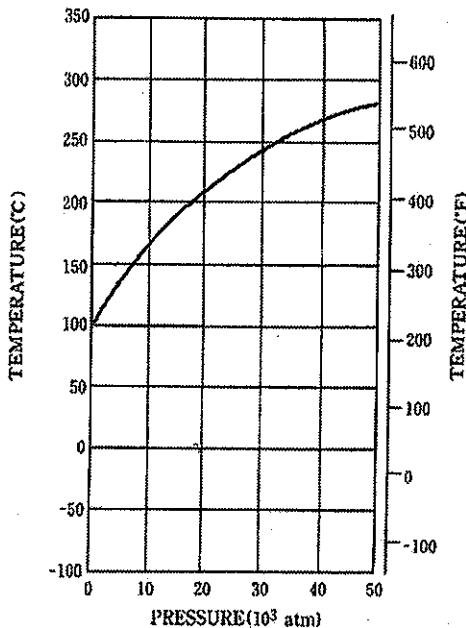
ここで、l: 温度t°Cでの長さ、l<sub>0</sub>: 0°Cでの長さ 線膨張係数  $\alpha = 6.893 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

(液体ナトリウムの体積膨張)

$$V = V_0 (1 + 2.4183 \times 10^{-4} t + 7.835 \times 10^{-8} t^2 + 15.64 \times 10^{-12} t^3)$$

ここで、V: 温度t°Cでの体積、V<sub>0</sub>: 0°Cでの体積

体膨張係数  $\beta = 2.58 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$  で  $\alpha$  の約3倍



ナトリウムの融点と圧力の関係

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-73 1991年7月 42

#### ④熱伝導率

熱伝導率kは物体を流れる熱流束密度と物体中の温度差の間の比例係数で、単位時間、単位断面積、単位温度差当たりに物体を通過する熱伝導量qとは次の関係にある。

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

ここで、T:温度、A:面積、x:Aに垂直で熱の流れに沿って図られる距離

◆固体ナトリウムの熱伝導率:k=1.356-0.00167t (W/cm·°C)

◆液体ナトリウムの熱伝導率:k=0.907-4.85×10⁻⁴t (W/cm·°C)

【参考資料4-7,4-8:液体ナトリウムの熱伝導率(表とグラフ)】

#### ⑤比熱

物質1gの温度1°Cだけ上げるのに必要な熱容量を比熱という。

(固体ナトリウムの比熱)

$$C_p = 0.2865 + 1.551 \times 10^{-4}t + 0.2516 \times 10^{-5}t^2 \text{ (cal/g°C)}$$

(液体ナトリウムの比熱)

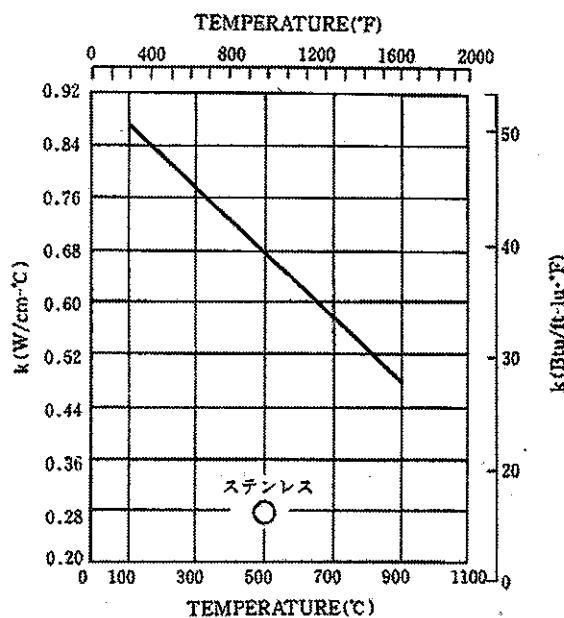
$$C_p = 0.34324 - 1.3868 \times 10^{-4}t + 1.1044 \times 10^{-7}t^2 \text{ (cal/g°C)}$$

【参考資料4-9,4-10:固体ナトリウムと液体ナトリウムの比熱】

## 液体ナトリウムの熱伝導率の温度依存性

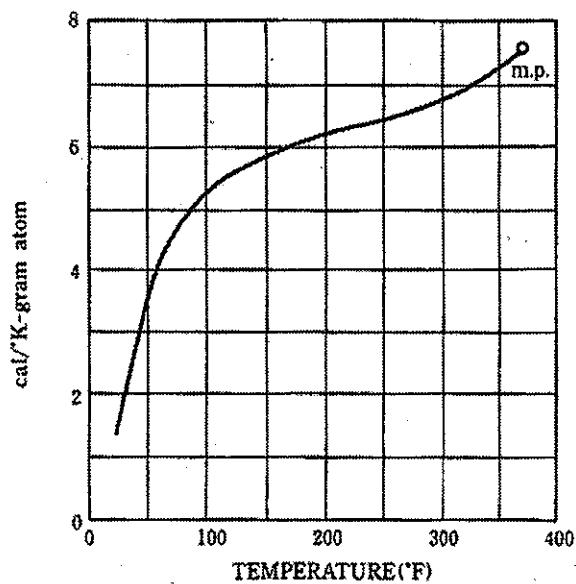
Temperature		Liquid sodium	
°C	°F	W/cm·°C	Btu/ft·hr·°F
50	122	0.869	50.2
100	212	0.844	49.8
150	302	0.820	47.4
200	392	0.796	46.0
250	482	0.771	44.5
300	572	0.747	43.1
350	662	0.722	41.7
400	752	0.698	40.3
450	842	0.673	38.9
500	932	0.649	37.5
550	1,022	0.624	36.1
600	1,112	0.599	34.8
650	1,202	0.576	33.2
700	1,291	0.550	31.8
750	1,381	0.526	30.4
800	1,471	0.502	29.0
850	1,562	0.477	27.6
900	1,652		

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術説明(第3編ナトリウムの諸性質)P3-63 1991年7月 44



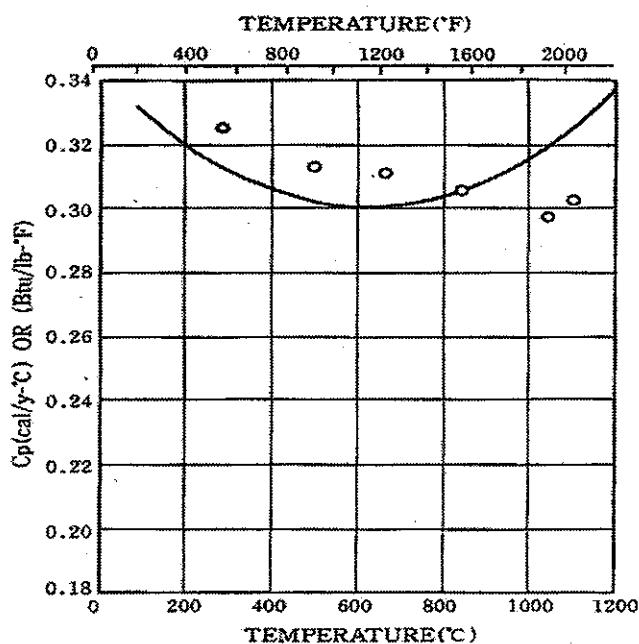
## 液体ナトリウムの熱伝導率の温度依存性

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術説明(第3編ナトリウムの諸性質)P3-74 1991年7月 45



### 固体ナトリウムの比熱の温度依存性

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術読本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-75 1991年7月 46



### 液体ナトリウムの比熱の温度依存性

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術読本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-75 1991年7月 47

### 4.3 電気的性質

#### ①電気抵抗率

電気抵抗率は物体の単位断面積と単位長さ当たりの電気抵抗である。単位は( $\Omega \cdot \text{cm}$ )であり、電気抵抗率の逆数が電気伝導率で単位は( $1/\Omega \cdot \text{cm}$ )である。  
(固体ナトリウムの電気抵抗率)

$$\gamma_s = 4.290 + 1.993 \times 10^{-2}t + 9.848 \times 10^{-6}t^2 \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

(液体ナトリウムの電気抵抗率)

$$\gamma_l = 7.756 + 2.054 \times 10^{-2}t + 3.481 \times 10^{-5}t^2 \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

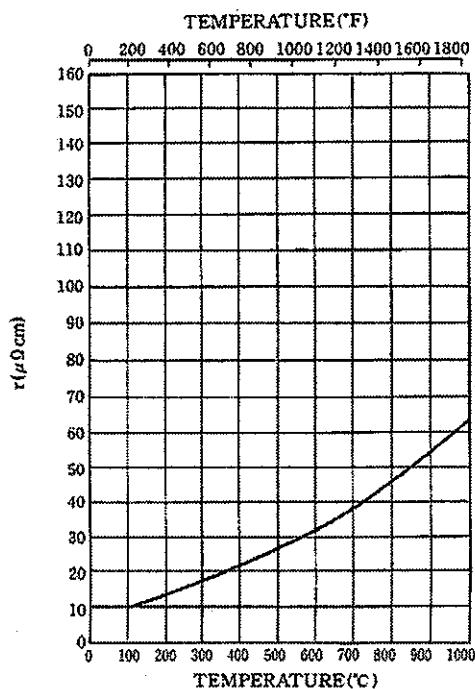
【参考資料1.4-11,4-12: 液体ナトリウムの電気抵抗率の温度依存性(表、グラフ】

参考資料4-11

#### 液体ナトリウムの電気抵抗率の温度依存性

Temperature °C	°F	Liquid sodium	
		$\mu \Omega \cdot \text{cm}$	$\mu \Omega \cdot \text{in.}$
50	122		
100	212	9.72	3.82
150	302	11.58	4.50
200	392	13.51	5.32
250	482	15.52	6.11
300	572	17.61	6.93
350	662	19.81	7.80
400	752	22.13	8.71
450	842	24.58	9.67
500	932	27.17	10.68
550	1,022	29.91	11.77
600	1,112	32.91	12.92
650	1,202	35.90	14.13
700	1,292	38.17	15.42
750	1,382	42.65	16.78
800	1,472	46.36	18.24
850	1,562	50.27	19.78
900	1,652	54.44	21.43
950	1,742	58.88	23.17
1,000	1,832	63.54	25.01
1,050	1,922	68.90	26.97
1,100	2,012	73.76	29.04
1,150	2,102	79.32	31.22
1,200	2,192	85.19	33.54

出典:PNC PN9520.91-006 高速増殖炉技術誌本。(第3編ナトリウムの諸性質)P3-64 1991年7月 49



液体ナトリウムの電気抵抗率の温度依存性

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第3編ナトリウムの諸性質)P3-78 1991年7月 50

## ナトリウムと他の冷却材との比較

項目	ナトリウム	ヘリウム	水蒸気
温度(K)	600	600	600
圧力(Mpa)	0.1	10	7.5
密度(kg/m³)	874	7.86	33.3
比熱(kJ/kg·K)	1.34	5.19	3.69
粘度(μPa·s)	327	32.2	21.04
熱伝導度(W/m·K)	75.7	0.254	0.0609
流速*(m/s)	4.52	47.4	27.1
熱伝達率*(kW/m²·K)	84.7	4.78	5.03
必要ポンプ動力*(W/m)	4.54	47.7	27.2

\* 直径8mmの円管内を圧力損失1mあたり20kPaで流れる場合

出典:FBR広報素材資料集(2版・上)12-1ナトリウム、平成2年3月

## 第5講 ナトリウムの核的性質

### 5.1 放射性同位元素

- ◆天然ナトリウムは質量数23の安定同位元素であり、放射線は放出しない。
- ◆原子炉内での生成放射能は中性子スペクトルに依存している。単純な( $n, \gamma$ )反応により $^{24}\text{Na}$ が生成される他、( $n, 2n$ ) ( $n, p$ ) ( $n, \alpha$ ) 反応により $^{22}\text{Na}$ や $^{23}\text{Ne}$ 、 $^{20}\text{F}$ などが生成される。
- 【参考資料5-1:ナトリウムの核反応】
- ◆原子炉の運転において問題となる放射線源は $^{22}\text{Na}$ と $^{24}\text{Na}$ であるが、その生成量は圧倒的に $^{24}\text{Na}$ の方が多い。
- ◆高速炉のナトリウム冷却材の誘導放射能として最も問題となるのは $^{24}\text{Na}$ であり、原子炉運転中はこの $^{24}\text{Na}$ から放出される $\gamma$ 線を十分に遮蔽する必要がある。
- ◆しかし、 $^{24}\text{Na}$ の半減期は15時間と比較的短いことから、半減期の10倍程度となる約1週間程度の冷却期間を置けば、その線源は十分減衰するので、保守時における放射線源としては余り問題にはならない。
- ◆一方、 $^{22}\text{Na}$ は生成量は少ないものの半減期が2.58年と長いため徐々に蓄積されて増加する。従って、保守時における放射線源としては $^{22}\text{Na}$ の方が問題となる。

52

参考資料5-1

【表 ナトリウムの核反応】

原核種	核反応	生成核種	半減期	放出放射線	放射線エネルギー
$^{23}\text{Na}$	$n, \gamma$	$^{24}\text{Na}$	15 h	$\gamma$	1.37Mev 2.75 Mev
	$n, p$	$^{23}\text{Ne}$	38sec	$\gamma$	0.44 Mev 1.65 Mev
					1.28 Mev
	$n, 2n$	$^{22}\text{Na}$	2.58y	$\gamma$	1.63 Mev
	$n, \alpha$	$^{20}\text{Fe}$	11sec	$\gamma$ $\beta$	5.40 Mev

出典:ナトリウム技術読本、「ナトリウムの特性」P1-12、大洗工学センター高速実験炉部、1981年12月

53

## 5.2 中性子捕獲断面積

- ◆原子炉の炉心を構成する物質の中性子捕獲断面積は、軽水炉及び高速炉ともプラントの運転及び経済性に重大な影響を与える重要な因子である。  
【参考資料2-2:ナトリウムの中性子捕獲断面積】
- ◆ナトリウムに対する中性子の捕獲断面積は、熱中性子領域で3.9バーンであるが、これは高速領域の場合とほぼ同じである。(「もんじゅ」における平均中性子エネルギーは約100kev～200kev)  
なお、中間エネルギー領域の2.85KeV付近において約370バーンの散乱共鳴がみられる。
- ◆ナトリウムの中性子捕獲断面積は、高速炉の原子炉冷却用として適度に低いものであるが、高い断面積を持つナトリウムの不純物もあるので、この点からもナトリウムの純度管理は重要である。

54

## 第6講 ナトリウムによる材料の腐食

### 6.1 ナトリウム腐食機構

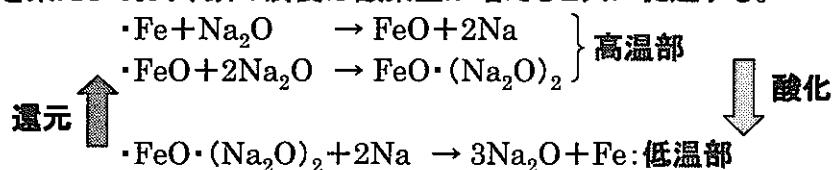
金属ナトリウムによる材料の腐食機構は、①不純物作用と②ナトリウムへの溶出と析出の二つに大別される。

#### ①不純物の作用による腐食

金属ナトリウム中の不純物(酸素、炭素、水素など)と材料中の特定元素との相互作用(不純物との反応や不純物を媒体とした溶出)が支配的になって腐食が進行するものであり、ナトリウム純度管理技術と密接に関連する。

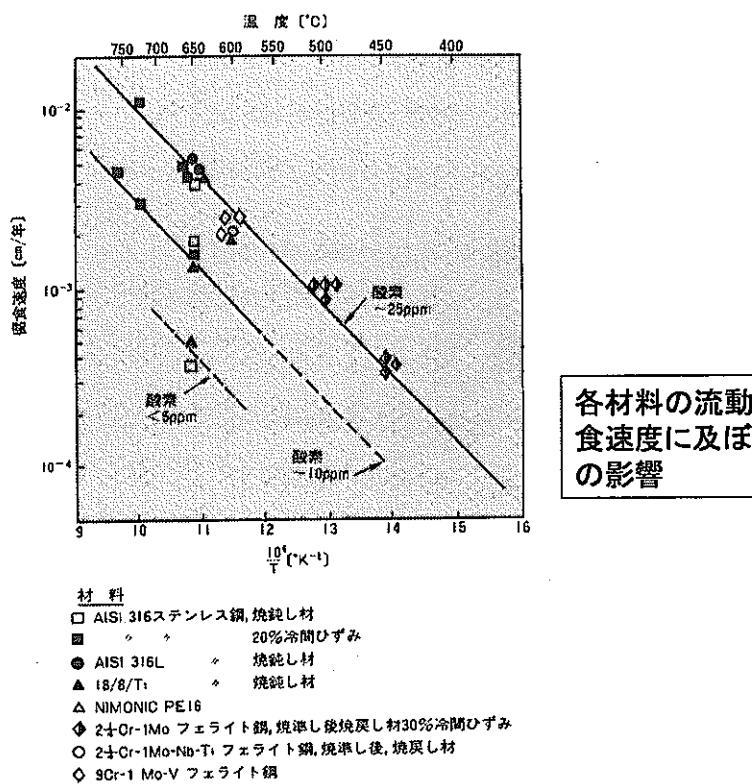
#### ②酸素による腐食作用

不純物としては酸素が最も重要視される。ナトリウム中の酸素は高温部で材料中の鉄(Fe)と反応し $\text{FeO} \cdot (\text{Na}_2\text{O})_2$ などの皮膜を形成して溶出(高温酸化)する一方、低温部では分解され(低温還元)Feが管壁などに析出する。酸素がいわば触媒の役目を果たしており、鉄の腐食は酸素量が増えると共に促進する。



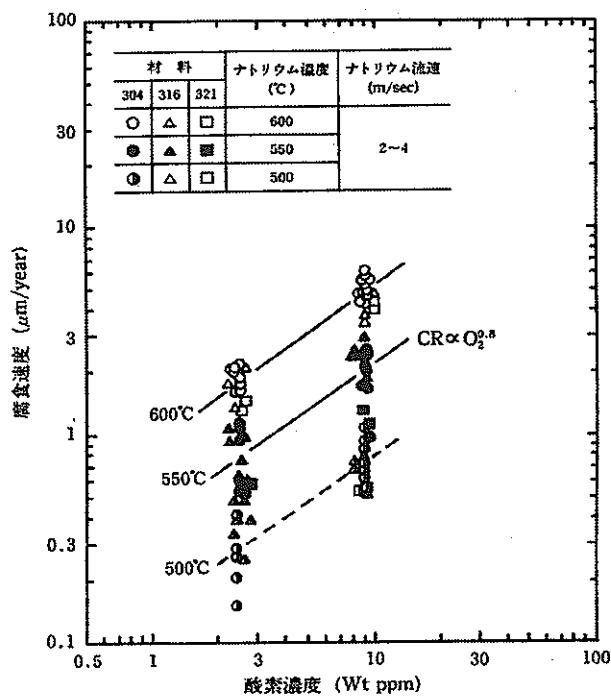
【参考資料6-1～参考資料6-3を参照】

55



参考資料6-1

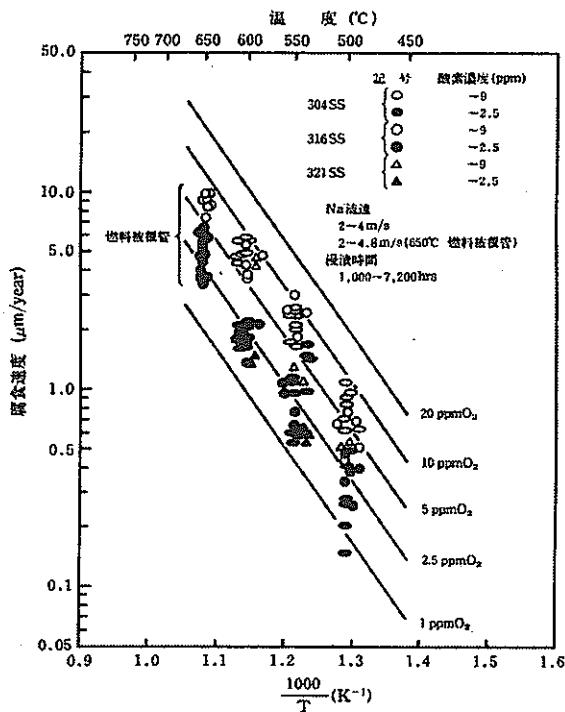
出典: FBR広報素材資料集、「ナトリウムと材料の適合性」P12-2、科学技術庁、1990年2月 56



参考資料6-2

【腐食速度と酸素濃度との関係】

出典: PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-38 1991年7月



【オーステナイトステンレス鋼の腐食速度】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術読本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-40 1991年7月

### ◎炭素による腐食作用(脱炭・漫炭)

炭素は微量で材料の強度性能を大きく左右する元素であり、脱炭・漫炭は注目すべき現象である。炭素はフェライト系の熱交換器材（「もんじゅ」では21/4Cr-1Mo鋼）中では炭素活量が高いため活量の低いステンレス鋼に移行し、脱炭による強度の低下と漫炭による延性の低下を招く可能性を考慮する必要がある。

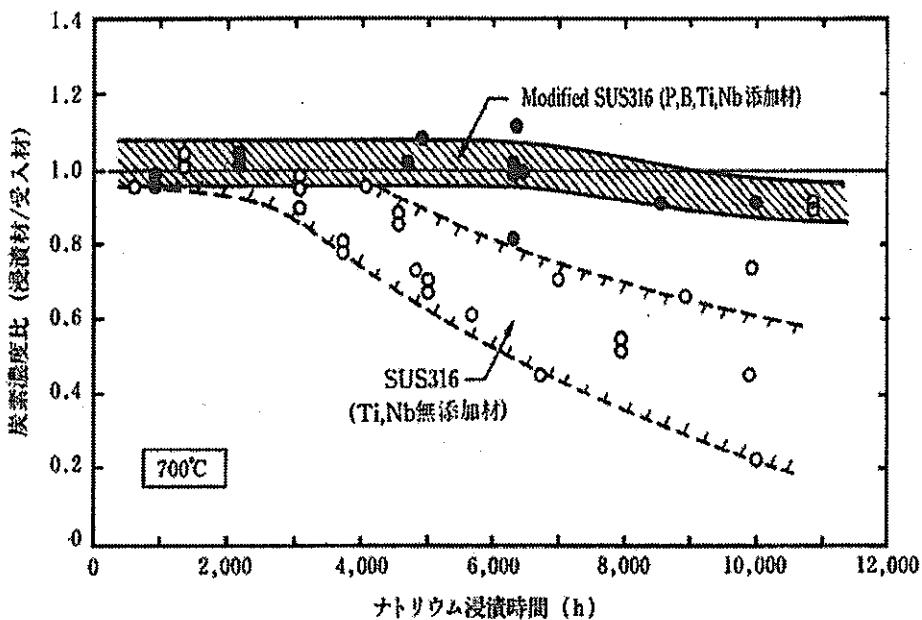
#### ★1次系における脱炭・漫炭

- ◆1次冷却系で最も注目すべきは、高温領域で使用され、かつ薄肉構造である燃料被覆管やラッパ管などの炉心材料の脱炭現象である。
- ◆鋼中の炭素濃度は長時間経過するほど減少し、脱炭現象が顕著となる。脱炭は引張強度やクリープ破断強度の低下を引き起こす。

#### 【参考資料7-4:ナトリウム浸漬時間に伴う鋼中の炭素濃度変化】

- ◆クリープ強度と照射スエーリング強度改善のためにチタン及びニオブなどが適当に添加された燃料被覆管では安定した炭化物の形成により炭素活量が低下し、高温・長時間側でも脱炭量は僅かとなっている。
- ◆なお、炉心材料を除く構造材料は使用温度が550°C以下であるため通常脱炭は生じない。

#### 【参考資料6-4を参照】



【ナトリウム浸漬時間に伴う鋼中の炭素濃度変化】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-42 1991年7月

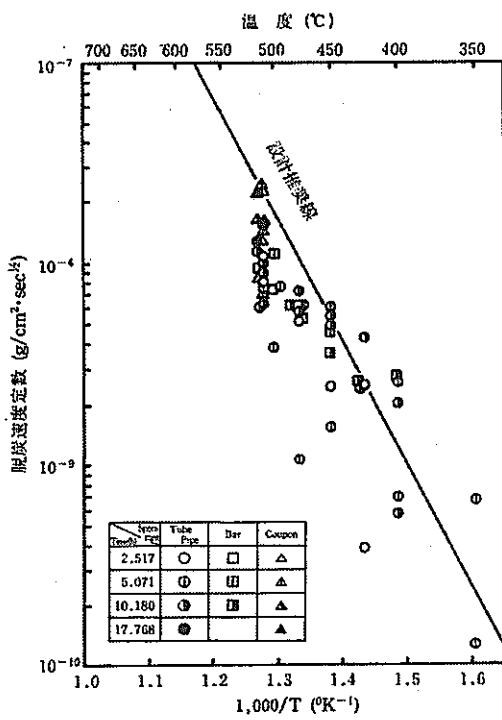
60

### ☆2次系における脱炭・漫炭

- ◆2次冷却系では、蒸発器伝熱管の材料には応力腐食割れなどの対策からフェライト系材料（「もんじゅ」では21/4Cr-Mo鋼）が、一方過熱器伝熱管やその他の配管・機器類にはステンレス鋼材が使用されている。すなわち、2次冷却系はステンレス鋼とフェライト鋼とのバイメタリックなシステムとなっている。
- ◆金属ナトリウムは微量な炭素を溶解するため、バイメタリック系では炭素活量の高いフェライト鋼が脱炭され、金属ナトリウムを介してステンレス鋼が漫炭される。但し、その量はステンレス鋼の強度特性に影響を与えるほどのものではない。
- ◆漫炭現象は、材料の延性低下を招く。

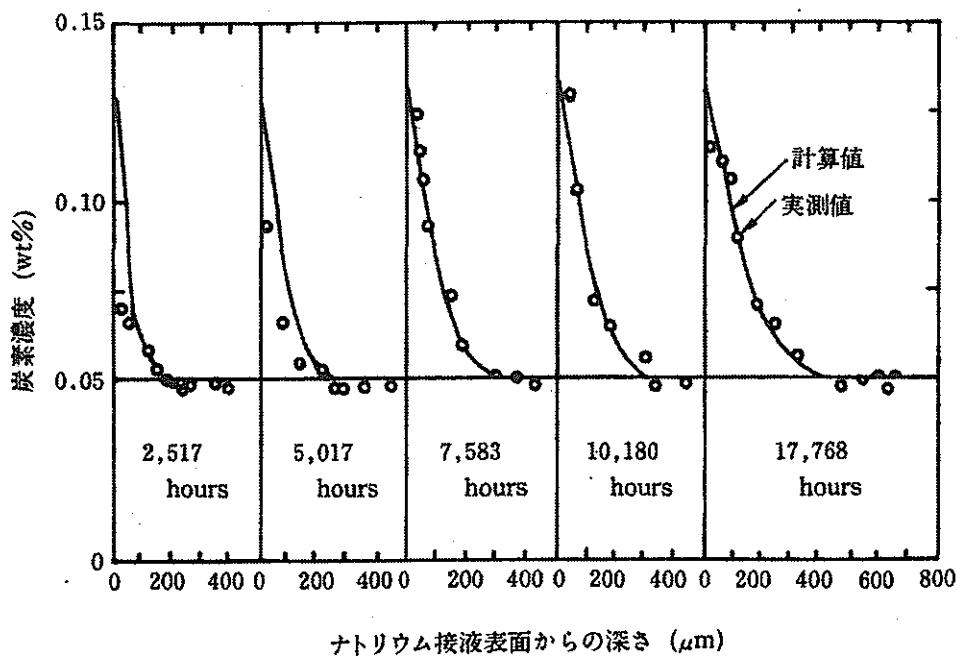
【図6-5～図6-6を参照】

61



【21/4Cr-1Mo鋼のナトリウム中脱炭速度定数】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-44 1991年7月  
62



【バイメタリック・ナトリウムループにおけるSUS304鋼の浸炭】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-44 1991年7月  
63

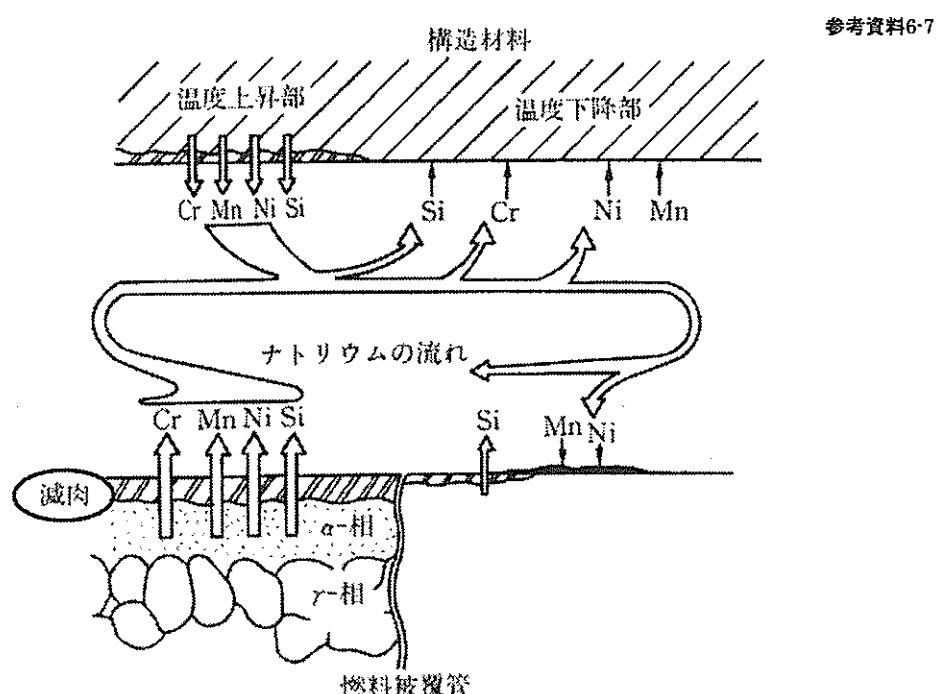
## ②液体金属ナトリウムへの溶出と析出

ループ内で高温部の構造材料の特定成分が液体ナトリウム中に溶出してナトリウムの流れにより運ばれ、低温部の管壁に沈着(質量移行)するもので、その量は温度分布や流量条件などループの特性に依存して決まる。

- ◆金属ナトリウムは還元作用が強いため、材料表面の酸化膜を容易に還元し、金属と金属との反応、即ち金属材料から金属ナトリウム中への溶出現象が生じ腐食が進行する。
- ◆この腐食は、金属ナトリウム中における成分元素の溶解度と材料中の拡散速度に最も支配される。
- ◆原子炉プラントのように高温部と低温部があり温度分布が存在している場合は、高温領域で溶出した元素が低温領域で過飽和となって析出するため、溶出が時間と共に継続される。このような温度差を有する系内での溶出・析出の現象を「温度勾配質量移行:Thermal Gradient Mass Transfer」という。

【図6-7～図6-10を参照】

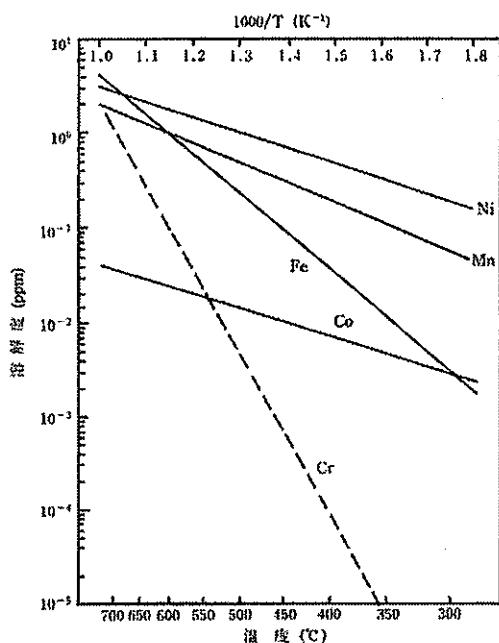
64



【1次冷却系における腐食・質量移行現象の模式図】

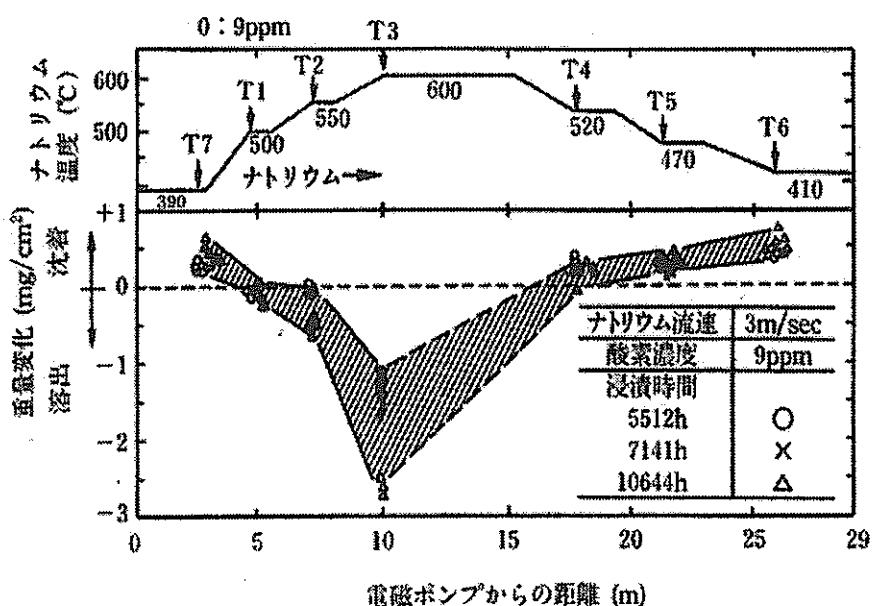
出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性) P10-35 1991年7月

65



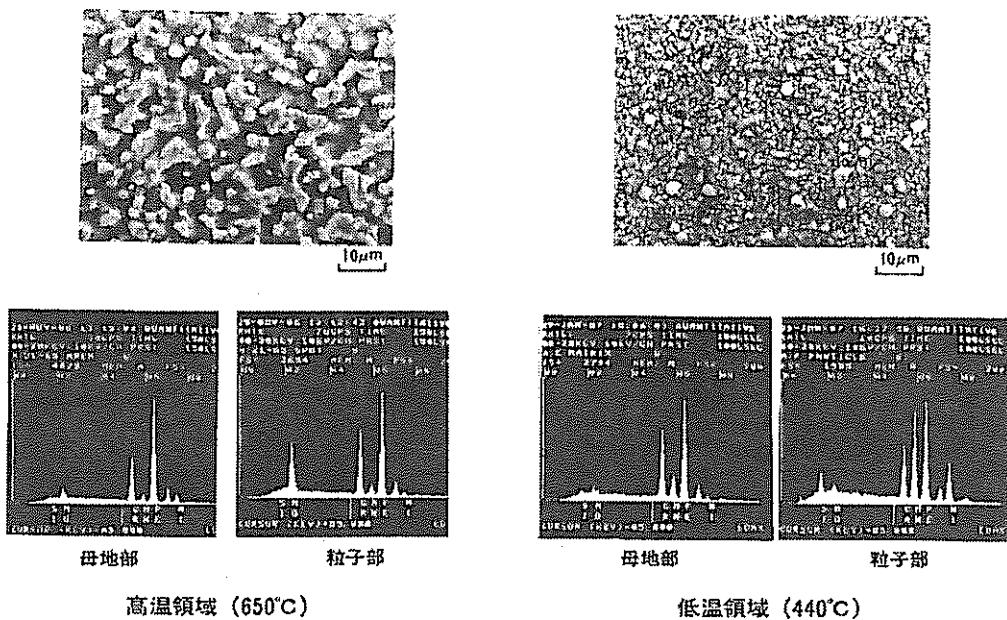
【ナトリウム中遷移金属元素の溶解度】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-34 1991年7月



【流動ナトリウム中腐食試験後のSUS316鋼の重量変化】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-34 1991年7月



【オーステナイトステンレス鋼(SUS316)のNa中腐食形態の一例】

出典:PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術読本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-35 1991年7月

## 第7講 ナトリウムの純度管理

ナトリウムは非常に化学的に活性物質であるので冷却材バウンダリーには高度の密封性が要求され、十分な品質管理が要求される。特にナトリウム中に含まれる不純物と材料腐食の問題は密接な関係があり、運転中においてはナトリウムを高純度に保つことが必要である。

### 7.1 ナトリウム冷却材の不純物

ナトリウムは酸素や水素、炭素と反応し易く強い親和性を持っている。これらは冷却材中の最も代表的な不純物である。

#### ① 酸素

酸素は冷却材中に最も代表的な不純物であり、プラント建設時に系統内の汚れや錆びとして持ち込まれたものや、運転期間中においては燃料交換時に新燃料集合体表面の吸着物として持ち込まれたもの、並びに機器の分解点検や補修時における空気の混入といったものが主たる要因として挙げられる。

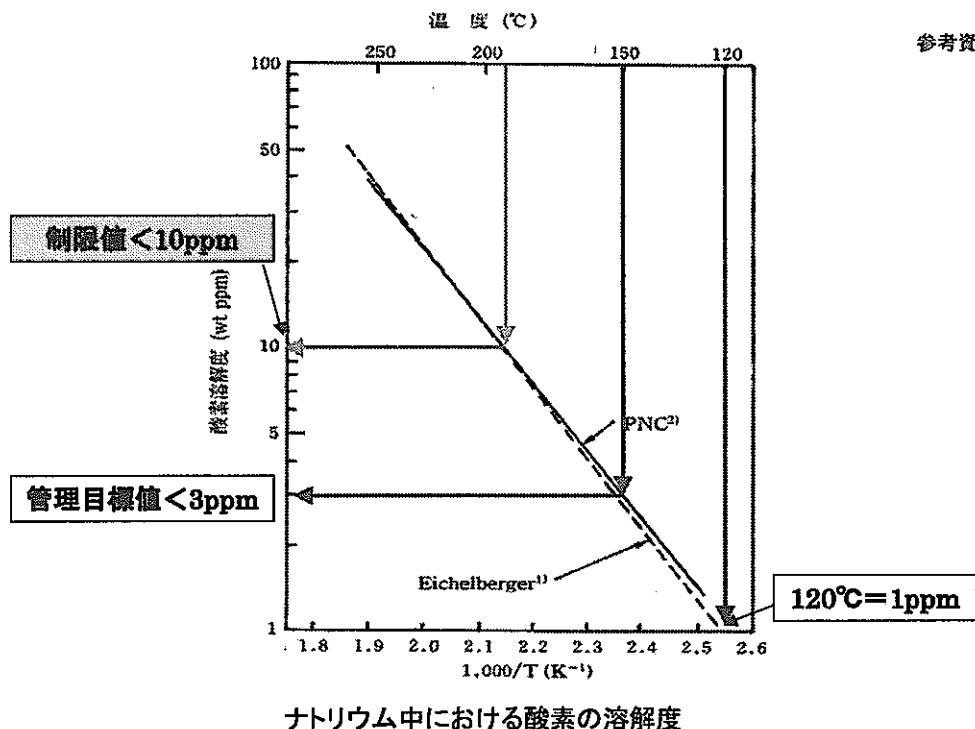
#### ◆酸素のナトリウム中溶解度

酸素のナトリウム中溶解C(ppm)は温度T(k)に依存する。次の実験式が与えられている。

$$\cdot \log C = 6.293 - 2447/T \dots \text{Eichelbergerの式}$$

$$\cdot \log C = 6.118 - 2383/T \dots \text{PNC実験式}$$

【参考資料7-1:ナトリウム中における酸素溶解度】

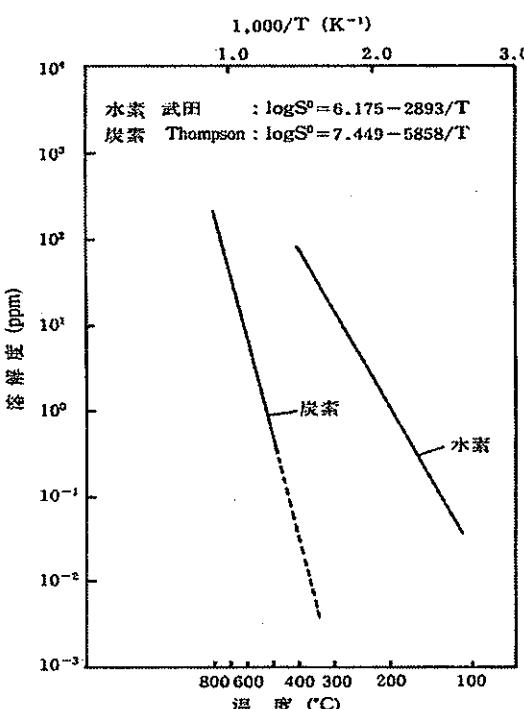


- ◆酸素溶解度は図に示すように大きく温度に依存し、300～400°Cの温度領域では数百ppm、120°Cでは1ppmの濃度である。材料の腐食は酸素濃度に大きく左右され濃度が高いほど腐食量も増大する。
- ◆しかし、冷却材中の不純物酸素はコールドトラップ(C/T)の温度を低く保持することによりメッシュ部に酸化物として析出させ容易に除去できるので不純物酸素濃度を抑制することができる。
- ◆コールドトラップの運転寿命は、1次系では主として酸化物の析出量に支配されるが、2次系では水素化合物の析出量により決まる。

## ②水素

- ◆水素の溶解度は酸素に比較して低いが、特に2次冷却系では無視することのできない不純物である。2次系では蒸気発生器伝熱管の水側腐食で発生する水素が管壁を拡散し、ナトリウム冷却材中に移行するからである。
- ◆水素は酸素と同様にコールドトラップで水素化合物として析出除去される。

【参考資料7-2:ナトリウム中における水素と炭素の溶解度】



ナトリウム中における水素及び炭素の溶解度

出典: PNC PN9520 91-006 高速増殖炉技術誌本、(第10編ナトリウムと材料の共存性)P10-33 1991年7月

### ③炭素

- ◆炭素については遊離炭素濃度(C)と活性炭素濃度( $C_2^{2-}$ )を区別して考える必要があり、構造材料の観点からは後者が重要である。
- ◆ナトリウム中の炭素活量は構造材料の脱・漫炭現象に大きな影響を与え、材料の機械的特性に変化をもたらす。
- ◆不純物炭素は、酸素や水素と違ってコールドトラップによって抑制することが困難である。

### ④ その他の不純物

- ◆酸素、水素、炭素以外の不純物としては、構造材料として用いられているステンレス鋼などの材料から腐食によって溶け出す合金元素がある。
- ◆主な合金元素として鉄、ニッケル、クロム、マンガン及びコバルトなどが挙げられるが、合金元素の溶解度は数百°Cの領域でもppmオーダ以下の低い値である。
- ◆これらの不純物について注目すべき点は、腐食の問題というより $^{54}Mn$ や $^{60}Co$ などの放射線源が配管・機器の管壁や燃料集合体の表面などに沈着し、運転・保守時の被ばく源になることである。

## 7.2 「もんじゅ」におけるナトリウム純度管理基準

### ① 1次冷却系

◆酸素濃度(制限値:10ppm以下、管理目標値:3ppm以下)

#### ➡ 制限値10ppm以下の設定根拠\*

ナトリウム酸素不純物存在下における構造材料の腐食速度は均一腐食として算出された値で示されるが、実際には構造材料中の元素によって溶出しやすい元素と、しにくい元素がある。「もんじゅ」ではこれらの現象も考慮し、プラント寿命中の機械的強度を確保する材料の厚みと溶出・腐食速度との設計上の検討から最大ナトリウム中酸素濃度を10ppm以下とするよう設定した。

10,000時間の流動ナトリウム浸漬試験( $390^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ )より、酸素濃度が10ppm以下に保たれていれば約 $2 \mu\text{m/y}$ の腐食速度に抑制でき肉厚減少の観点からは問題にならないことを確認した。

#### ➡ 管理目標値3ppm以下の設定根拠\*

管理目標値3ppm以下という値は、燃料被覆管の機械的強度設計上、溶出・腐食を考慮した腐食量算定の前提条件として与えられた値であり、1次系C/T出口酸素濃度2ppmに余裕を見て原子炉の運転や燃料交換時における1次冷却材中酸素濃度として期待できる値である。

74

なお、3ppm以下の濃度はプラギング計温度 $152^{\circ}\text{C}$ 以下でC/T運転計画値を $140^{\circ}\text{C}$ 以下に設定することにより通常の原子炉運転中に期待できる値である。

---

\* 出典:もんじゅ設計技術データベース No. H5-058(058G1)「1次系ナトリウム純度(ナトリウムの酸素濃度10ppm以下)」

#### ◆その他不純物濃度

設計上規制する要求は特ないが、カバーガスからの不純物移行挙動の把握、構造材料の脱浸炭挙動の把握などの観点から、水素(5ppm以下)、炭素(30ppm以下)などについて設定している。

75

## ② 2次冷却系

◆酸素濃度(制限値:10ppm以下、管理目標値:7ppm以下)

➡ 制限値:10ppm以下の設定根拠

2次系においても1次系と同様根拠により酸素濃度制限値を10ppmと設定している。

➡ 管理目標値:7ppm以下の設定根拠\*

2次系においては蒸気発生器や中間熱交換器のナトリウム機器に狭隔部が存在するが、それらの狭隔部位にナトリウム中不純物が沈着・付着して流路閉塞を起こすことが懸念される。管理目標値はそのような事故を防止する観点から定めるものであり、2次系ナトリウム温度がC/T冷却管出口最高温度(180°C)よりも高い温度を維持していることから180°Cのナトリウム中酸素飽和濃度<7ppmを管理目標値として設定した。

◆水素濃度(制限値:170ppb以下)

➡ 制限値170ppb以下の設定根拠\*

2次系においては蒸気発生器伝熱管リーク監視確認の観点から水素濃度にも注目する必要がある。170ppbの値はナトリウム中水漏洩検出器のバックグラウンドとの関係から定めた値であり、この値を超過した場合は伝熱管破損の疑いがあるとして運転対応するよう定められている。

\* 出典:もんじゅ設計技術データベース No. H5-058(058G1)「ナトリウム純度(2次ナトリウム)」

76

## 第8講 ナトリウムの貯蔵と輸送

### 8.1 ナトリウムの貯蔵

一般屋内貯蔵倉庫の貯蔵においては、次の点に留意しなければならない。

- ◆ナトリウムは、乾燥した平屋建の耐火建築で通気が良く床がコンクリートか金属板の倉庫に独立させて貯蔵する。
- ◆倉庫は屋根や窓から雨水が漏れないように設計され、床は水の流入を防止するため地面より高くする。
- ◆倉庫内の高所に換気口を設けて湿気の停滞を防止し、結露防止に留意しなければならない。
- ◆内部に水、蒸気のパイプを配置してはならない。
- ◆容器は適当な架台上に置き、水と偶然に接触することを防止する。
- ◆倉庫内には他の薬品類を収納しないようにし、特に酸化性塩類、腐食性液体、酸類と同置してはならない。
- ◆倉庫は定期的に点検して不良箇所の発見と補修改善に努め、保管の保全を図る。
- ◆発火時の消火用に適当な消火剤を十分に備えておき、適当な火災感知設備を設置しなければならない。
- ◆実験室等で少量のナトリウムを保管する場合は、パラフィン、軽油又は灯油に浸してガラス容器内に密栓し、これに蓋付の金属容器に入れ他の薬品類と隔離しておく。

77

## 8.2 ナトリウムの輸送

金属ナトリウムは容器に入れて輸送する。金属ナトリウムの輸送において乱暴な取扱、不注意な管理は思わぬ災害を引き起こす恐れがあるので次の点に注意を要する。

- ◆容器の移動や運搬に際しては、危険物保安監督者が立会いその監督下で作業を行う。
- ◆容器を引きずったり、滑らせたり、落としたり、互いに激突させる乱暴な取扱をしてはならない。
- ◆容器を車両、船舶で運搬する時は転落を防止するため、歯止め、縄がけ等により縛り固定させる。
- ◆水や湿気等に触れないようにする。
- ◆酸化性塩類、腐食性液体及び酸類との混載を避ける。
- ◆運搬車両には危険物関係法令に定められた「危」の表示板を車両前後の見易い個所に掲げること。

78

## 第9講 ナトリウム取扱関連法規

### 9.1 関係法規

ナトリウムは法規上第3類危険物として取扱われる。重要と思われる事項について以下に述べるが詳細については直接消防法関係法規集を参照されたい。

【参考資料9-1:危険物関連法規一覧】

### 9.2 危険物の貯蔵、取扱いの制限 (法10の1~4)

- ◆指定数量以上の危険物は、製造所、貯蔵所及び取扱所(法11)以外の場所でこれを取り扱ってはならない。ナトリウムの指定数量は10kgである。(平成2年5月23日施行)
- ◆所轄消防庁又は消防署長の承認を受けて、指定数量以上の危険物を10日以内の期間、上記以外の場所で仮に貯蔵し、又は取扱う場合はこの限りではない。
- ◆指定数量未満であっても、その1/5以上を上記以外の場所で貯蔵又は取扱う場合には同上先への届け出が必要である。(法9の2)

79

【表 危険物関連法規一覧】

法規名称	施行	法令等
消防法	昭和 23 年 7 月 24 日	法規第 186 号
危険物の規制に関する政令	昭和 34 年 9 月 26 日	制令第 306 号
危険物の規制に関する規制	昭和 34 年 9 月 29 日	総理府令第 55 号
危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示	昭和 49 年 5 月 1 日	自治省告示第 99 号
消防法施行令	昭和 36 年 3 月 25 日	政令第 37 号
消防法施行規制	昭和 36 年 4 月 1 日	自治省令第 6 号
消防法施行令別表第 1 の 2 及び同政令別表第 1 の 3 の自治省令で定める者及び数量を指定する省令	昭和 56 年 5 月 28 日	自治省令第 13 号
危険物船舶運送及び貯蔵規則	昭和 32 年 8 月 20 日	運輸省省令第 30 号
危険物船舶運送及び貯蔵規則	昭和 32 年 8 月 20 日	運輸省告示第 321 号
危険物を積載する車両の水底トンネルの通行禁止及び制限の告示	昭和 35 年 5 月 11 日	日本道路公団公示第 1 号
危険物貨物運送規制	昭和 24 年 9 月	日本国有鉄道公示第 125 号

### 9.3 製造所、貯蔵所又は取扱所の設置又は変更の許可及び完成検査等

(法11の1及び2)

- ◆製造所、貯蔵所又は取扱所を設置又は変更しようとする者は、政令の定めるところに従い、区分に応じ(令2・3)当該各号(市町村長、都道府県知事、自治大臣)に定める者の許可を得なければ成らない。
- ◆上記許可を受けた者は、市町村長が行う完成検査を受け(令8)これが技術上の基準(法10・4)に適合していると認められた後でなければ使用してはならない。

## 付録-2：保守研修テキスト例

「制御棒駆動機構コース」（縮小版）

# 制御棒駆動機構コース

平成18年1月  
核燃料サイクル開発機構  
国際技術センター

## 制御棒駆動機構コース

- ◆第1講：反応度と原子炉出力
- ◆第2講：制御棒駆動機構の概要
- ◆第3講：微調整棒駆動機構の動作メカニズム
- ◆第4講：粗調整棒駆動機構の動作メカニズム
- ◆第5講：後備炉停止棒駆動機構の動作メカニズム

## 第1講 反応度と原子炉出力

### 1. 反応度と原子炉出力

#### ★ 実効増倍率(Keff)

(核分裂により発生する中性子数)と(吸収もしくは炉外へ漏洩する中性子数)の比率を実効増倍率という。

#### ★反応度( $\rho$ )

実効増倍率の1.0との差を実効増倍率で割った比率を反応度とい。すなわち、反応度とは、実行増倍率の割合の変化を表している。(より詳細は付録を参照)

$$\rho = (K_{\text{eff}} - 1) / K_{\text{eff}}$$

#### ★原子炉出力

実効増倍率が1.0より大であれば反応度は正となり、核分裂反応は増大する。逆に実効増倍率が1.0より小さければ反応度は負となり核分裂反応は次第に減少する。実効増倍率が0、すなわち反応度0の状態が臨界状態であり、原子炉の定格出力運転はこの臨界状態で運転される。

- ・ $K_{\text{eff}} > 1.0 \rightarrow \rho > 0$  (正:超臨界)
- ・ $K_{\text{eff}} = 1.0 \rightarrow \rho = 0$  (臨界)
- ・ $K_{\text{eff}} < 1.0 \rightarrow \rho < 0$  (負:未臨界)

2

### 2. 反応度制御

炉心の反応度は、燃料が持つ正の反応度と制御棒の持つ負の反応度とに分けることができる。

#### ★余剰反応度( $\rho_E$ )

全ての制御棒を全引き抜きした架空の状態において、炉心の有する実効増倍率が1.0よりどれだけ大きいかを余剰反応度(過剰反応度)とい。すなわち、燃料が元々持っている反応度のことを余剰反応度とい。(次頁の図「炉心の反応度」参照)

#### ★原子炉停止余裕反応度( $\rho_M$ )

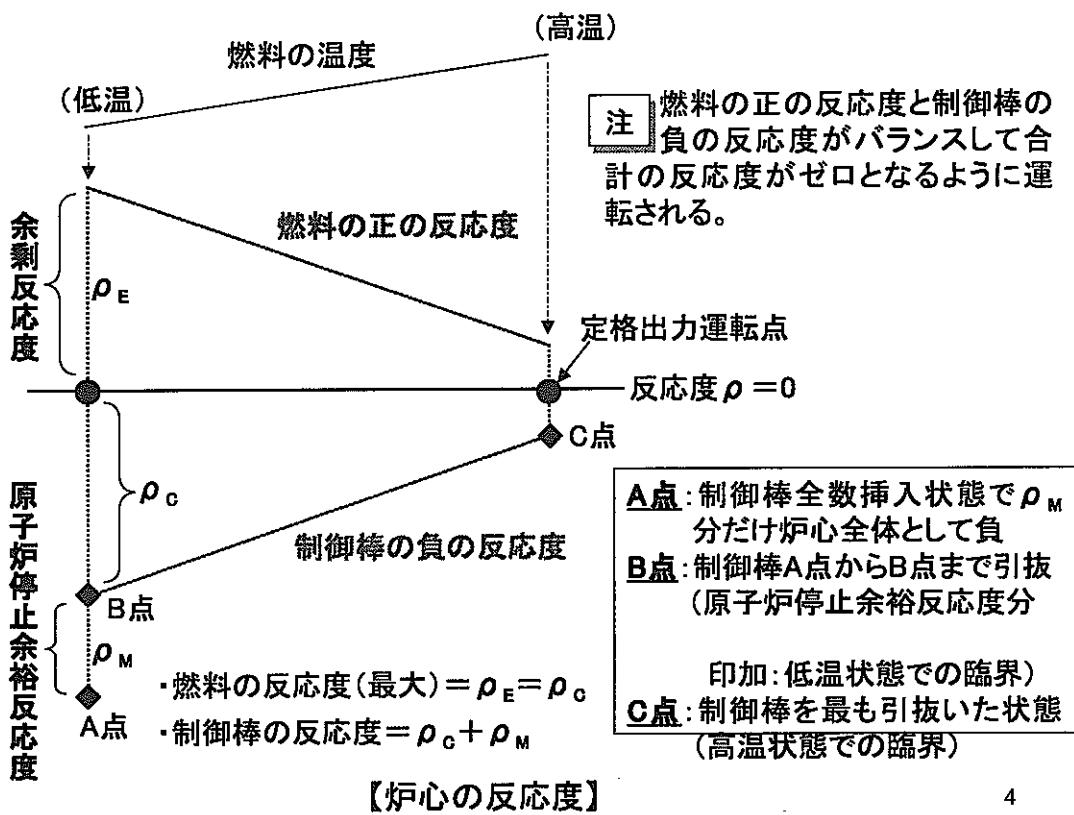
制御棒は燃料が有する余剰反応度を打ち消すことのできる反応度だけではなく、更なる負の反応度を有している。この負の反応度のことを原子炉停止余裕反応度とい。【次頁の図「炉心の反応度」参照】

#### ★反応度係数

原子炉出力が変化すると燃料や冷却材、構造材の密度変化等により反応度が変化するが、この物質の温度や原子炉出力単位当たりの反応度の変化割合を反応度係数とい。反応度係数には種々の係数があるが、ドップラ係数と炉心支持板温度係数は代表的な負の反応度係数である。炉心設計においては炉心全体の反応度係数(出力係数)が負になるように設計される。

【表「もんじゅ」反応度係数参照】

3



(設置許可申請書 添八P8-3-53)  $\times 10^{-2} \Delta k/k$

所要反応度		初装荷炉心		平衡炉心	
		調整棒	後備炉停止棒	調整棒	後備炉停止棒
	出力補償	1.9	1.9	1.7	1.7
	燃焼補償	2.5	—	2.6	—
	運転余裕	0.3	—	0.3	—
	炉の反応度の誤差吸収	1.0	—	1.0	—
	合 計	5.7	1.9	5.6	1.7
	制御棒価値	7.1*	5.9	7.0*	5.8
	余裕反応度	1.4	4.0	1.4	4.1

\* 最大反応度価値を持つ制御棒1本が全引抜状態のまま挿入できないとした場合の数値。

### 【「もんじゅ」反応度バランス】

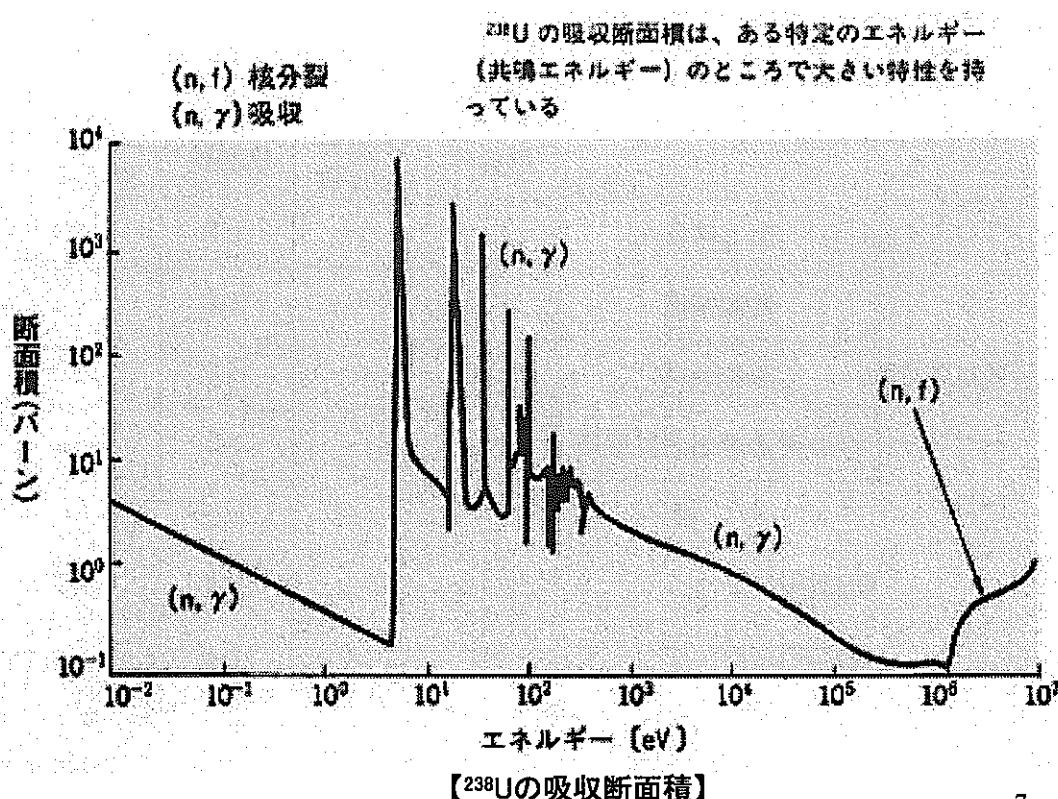
「もんじゅ」反応度係数	
ドップラ係数 <sup>注)1</sup>	$-(5.7 \sim 7.6) \times 10^{-3} T dk/dT$
燃料温度係数	$-(3.3 \sim 3.9) \times 10^{-6} \Delta k/k/^\circ C$
構造材温度係数	$+(6.0 \sim 10.0) \times 10^{-7} \Delta k/k/^\circ C$
冷却材温度係数 <sup>注)2</sup>	$+(1.0 \sim 14.0) \times 10^{-7} \Delta k/k/^\circ C$
炉心支持板温度係数 <sup>注)3</sup>	$-(10.0 \sim 12.0) \times 10^{-6} \Delta k/k/^\circ C$
出力係数(トータルバランス反応度) <sup>注)4</sup>	$-(9.4 \sim 11.0) \times 10^{-6} \Delta k/k/MW$
1 炉心燃料集合体ボイド反応度	$+(1.1 \sim 1.5) \times 10^{-4} \Delta k/k$

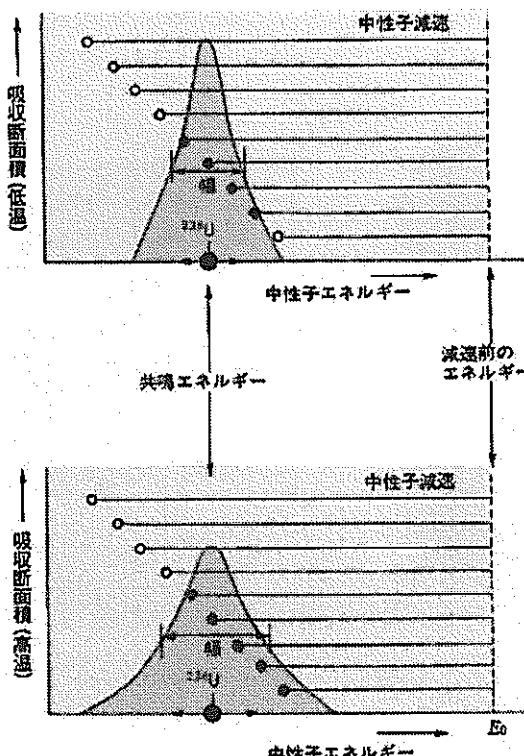
注)1: 燃料温度が上昇すると<sup>238</sup>Uの共鳴吸收の幅が広がるため中性子吸収が増加する。

注)2: 温度上昇により冷却材分子結合が薄くなることによる中性子漏洩と、減速しづらくなることに伴う中性子スペクトル硬化による中性子発生割合増加があるが、「もんじゅ」は中型炉であるので漏洩分は少なくトータル的には正である。このメカニズムはボイド反応度についても全く同様であり、ボイドも結果的には正である。

注)3: 支持板が広がると炉心燃料の稠密度が下がり負の反応度が生じる。

注)4: ドップラと炉心支持板温度係数が大きくトータル的には負の反応度である。 6





【ドップラ効果のイメージ図】

### 【ドップラ効果とは】

燃料中の<sup>238</sup>Uの原子核は静止しているわけではなく熱運動によって非常に小さな振動をしている。<sup>238</sup>Uの原子核に中性子が衝突する反応を考えて見ると<sup>238</sup>Uの原子核は振動しているので、<sup>238</sup>Uが中性子に近づく方向へ働いている時は、<sup>238</sup>Uと中性子との相対的な速度(エネルギー)は大きくなり遠ざかる時は小さくなっている。つまり、中性子のエネルギーがある値Eであっても<sup>238</sup>Uと中性子との相対速度は<sup>238</sup>Uの原子核が振動しているため、ある幅を持つこととなる。<sup>238</sup>Uが吸収する割合はこの相対速度によって決まるので燃料の温度が上昇すると、<sup>238</sup>Uの熱運動が激しくなることにより共鳴吸収の幅が広がり、結果としてより多くの中性子が吸収されることから負の反応度が生じることとなる。

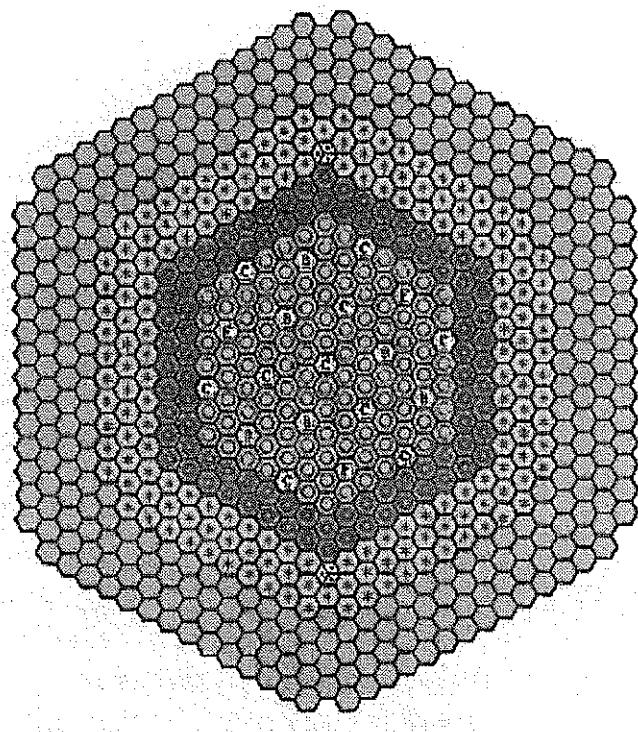
8

## 第2講 制御棒駆動機構の概要

### 1. 概要

- ◆「もんじゅ」の原子炉の反応度制御は、調整棒と後備炉停止棒から成る制御棒によって行われる。調整棒は、3体の微調整棒(FCR)と10体の粗調整棒(CCR)から成り、後備炉停止棒は6体で構成されている。(炉心マップ参照)
- ◆通常の原子炉の起動、停止、出力制御は調整棒で行い、万一原子炉の緊急停止が必要とされる異常状態が生じた場合は、安全保護系からの信号を受けて主炉停止系である調整棒13体と後備炉停止系の後備炉停止棒6体が一斉に炉心内に挿入される。
- ◆主炉停止系と後備炉停止系は互いに独立している他、スクラム時の加速方式や制御棒の切離し方式などが異なり多様性を持たせた構成となっている。  
(微調整棒: 日立製、粗調整棒: 三菱製、後備炉停止棒: 東芝製)
- ◆制御棒は炉心上部機構上に据付けられている。炉心上部機構は細長い円筒状の薄肉構造で回転プラグ上から片持梁の構造で支持されている。(機構図参照)
- ◆制御棒は、設計上想定される巨大地震においても確実に作動するよう設計されている。(炉心上端部と炉心上部機構下端部の相対変位量が一定値以下になるように抑えられている。)

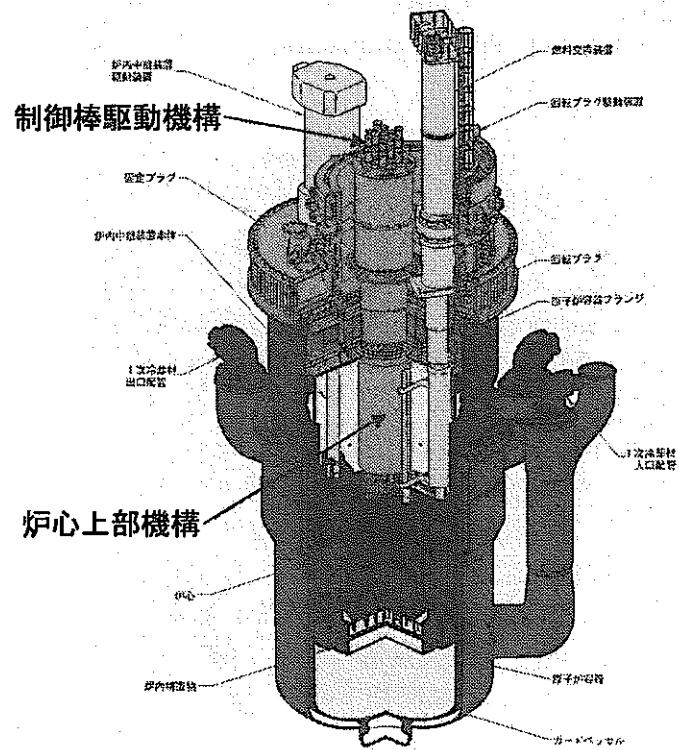
9



炉心構成要素	記号	数量
内側炉心	○	108
炉心燃料集合体	△	90
外側炉心	○	90
ブランケット燃料集合体	×	172
安全調整棒	F	3
制御棒集合体	C	10
遮蔽炉停止棒	B	6
中性子源集合体	△	2
中性子遮へい体	○	316
サーバランス集合体	○	8

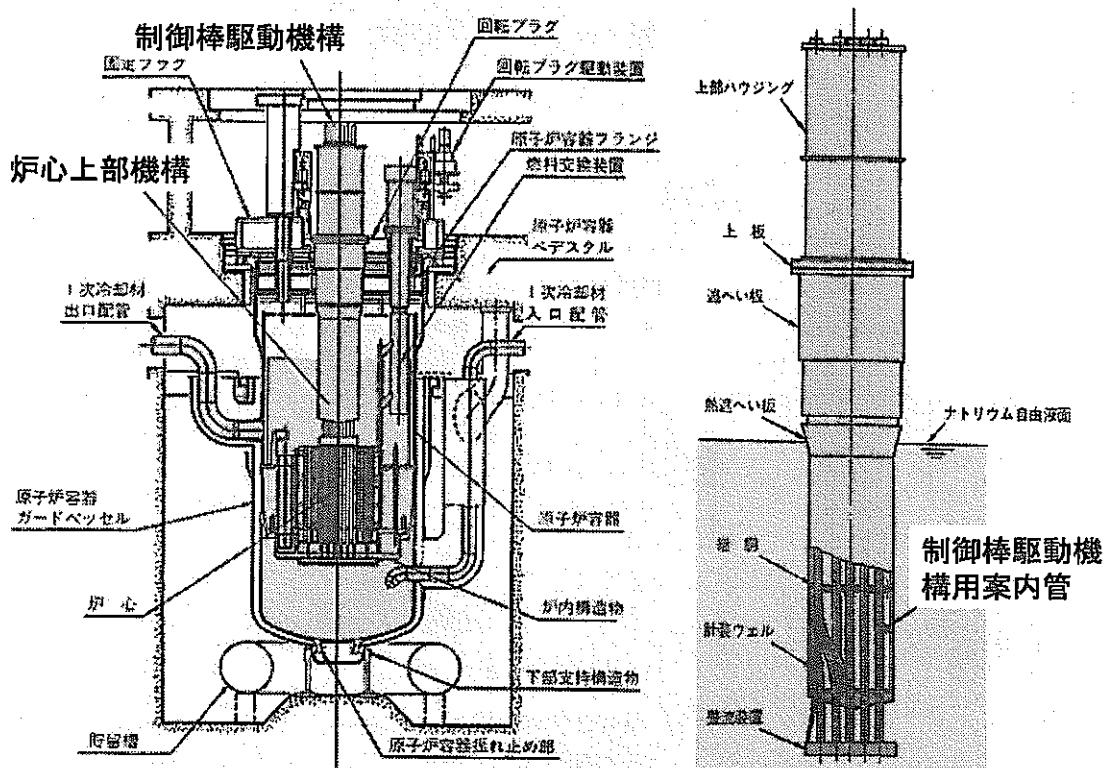
【「もんじゅ」炉心構成】

10



【原子炉容器／炉心上部機構鳥瞰図】

11



【炉心上部機構の構造外略図】

12

## 2. 調整棒駆動機構

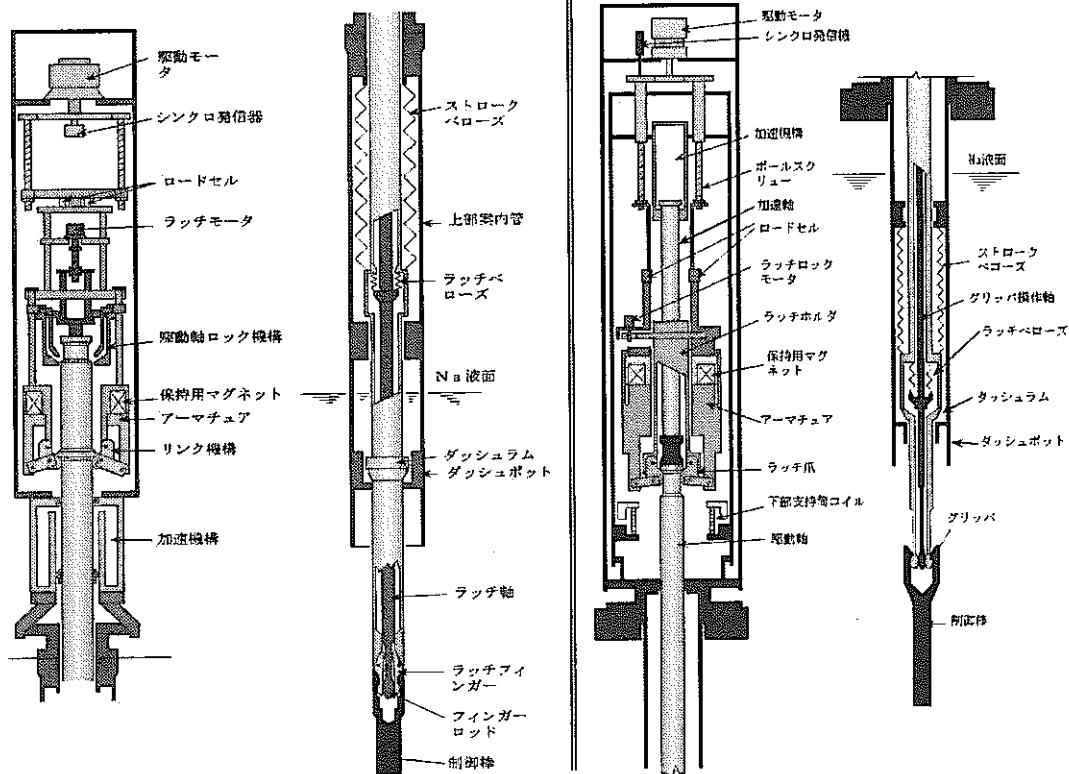
### (1)設備仕様

	微調整棒	粗調整棒
本数	3 本	10 本
ストローク	約 1000 mm	約 1000 mm
駆動速度	約 30～最大 300 mm/min (自動制御時可変)	最大約 120 mm/min (一定速度)
スクラム時挿入時間	1.2 秒以下	1.2 秒以下
駆動方式	電動機駆動	電動機駆動
スクラム方式	保持用電磁石消磁、ガス圧 加速挿入、ストローク・ラッチ 動作棒と微調整棒一体挿入	保持用電磁石消磁、ガス圧 加速挿入、ストローク・ラッチ 動作棒と粗調整棒一体挿入

### (2)構造の概略

微調整棒駆動機構と粗調整棒駆動機構の構造は、駆動部と上部案内管から構成されており似通った構造であるが、詳細的にはそれぞれの機能上の要求からくる構造の違いの他に、ベローズ位置、制御棒ラッチ・デラッチ機構の動作方式が異なっている。(次頁の構造概略図参照)

13



【微調整棒駆動機構の構造概略図】

【粗調整棒駆動機構の構造概略図】<sup>14</sup>

### (3)動作の概要

- ◆ 駆動モータの回転力を減速機を介してボールスクリューに伝達し、ボールネジとナットとの間で回転運動を上下直進運動に変換して調整棒の引抜・挿入を行う。
- ◆ 駆動モータの最大回転数は、駆動電源と負荷等との関係から物理的に制限され、この回転数に対応した引抜速度以上の急速な引抜は生じない。
- ◆ 微調整棒は、40%出力以上の自動運転領域時においてのみ可変で運転される。制御は、原子炉出口温度をカスケード信号として30～最大300 mm/minの速度範囲で行われる。なお、40%出力運転以下の領域では粗調整棒と同様に120mm/minの一定速度で操作が行われる。
- ◆ 原子炉トリップ信号により保持用電磁石が消磁すると、調整棒とストローク・ラッチ動作伝達部は連結されたまま一体で落下する。落下においては、加速機構が働いて調整棒とストローク・ラッチ動作伝達部はガス圧力により加速挿入される。
- ◆ 原子炉トリップ時挿入時間(全ストロークの85%挿入までの所要時間)は原子炉トリップ遮断器「開」後1.2秒以下である。
- ◆ 燃料交換時には、制御棒ラッチ機構をデラッチして調整棒駆動機構と調整棒とを切離し、回転プラグの回転の支障とならないようにする。

### 3. 後備炉停止棒駆動機構

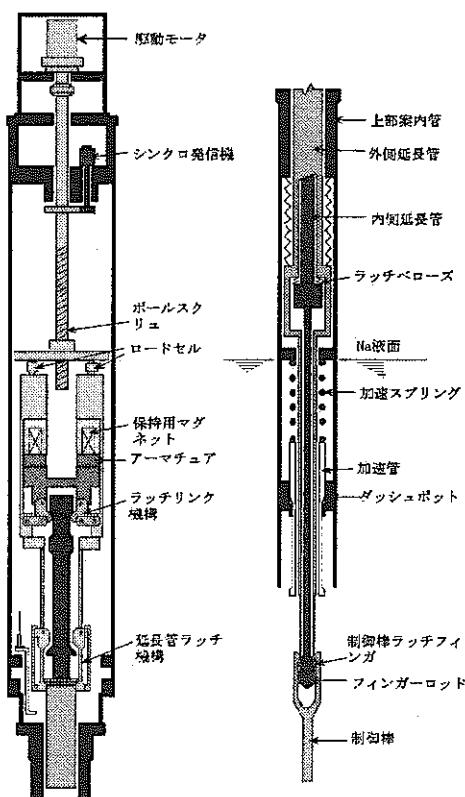
#### (1) 設備仕様

後備炉停止棒	
本数	6 本
ストローク	約 1100 mm
駆動速度	約 180 mm/min(一定速度)
スクラム時挿入時間	1.2 秒以下
駆動方式	電動機駆動
スクラム方式	保持用電磁石消磁、スプリング力加速挿入、後備炉停止棒切離し挿入

#### (2) 構造の概略

後備炉停止棒駆動機構の構造は、調整棒駆動機構と同様に駆動部と上部案内管から構成されている。構造的には「常陽」の制御棒と同一タイプである。  
(次頁の構造概略図参照)

16



【後備炉停止駆動機構の構造概略図】

17

### (3) 動作の概要

- ◆後備炉停止棒駆動機構は、通常出力運転時においては全数全引抜状態で保持される。
- ◆駆動モータの最大回転数は、駆動電源と負荷等との関係から物理的に制限され、この回転数に対応した引抜速度以上の急速な引抜は生じない。
- ◆原子炉トリップ時には、トリップ信号により保持用電磁石を消磁して制御棒ラッチ機構を動作させ、後備炉停止棒を切離すとともに、加速管を介してスプリング力で後備炉停止棒を加速挿入させる。
- ◆原子炉トリップ時挿入時間は調整棒と同様に原子炉トリップ遮断器「開」後1.2秒以下である。
- ◆また、燃料交換時は調整棒と同様駆動機構と後備炉停止棒とを切離し回転プラグの回転の支障とならないようにしている。

18

## 第3講 微調整棒駆動機構の動作メカニズム

### 1. ラッチ動作

項目	動作説明	機構位置
①駆動モータ下降	駆動モータにより駆動軸を燃料下限位置(50mm)まで挿入する。	駆動機構位置：燃交下限(50mm)
②保持用電磁石励磁	保持用マグネットを励磁する。	
③ラッチモータ下降	ボールラッチロッドをラッチモータにより駆動軸ロック位置からCR切離し位置まで約80mm挿入することにより駆動軸のロックが解除され制御棒ラッチ機構のラッチフィンガーを閉じる。	ラッチ機構位置：CRデラッチ位置(-65mm)
④駆動モータ下降	駆動モータにより駆動軸を下限リミット点灯位置まで挿入する。	駆動機構位置：下限位置(-6mm)
⑤ラッチモータ上昇	ラッチモータによりボールラッチロッドをCR切離し位置から通常位置まで約65mm引抜くことによりラッチ機構のラッチフィンガーを開いてCRをラッチする。	ラッチ機構位置：通常位置(0mm)
⑥駆動モータ上昇	駆動モータを駆動し、駆動軸とCRを引抜く。	駆動機構位置：下限位置(0mm)

19

項目	①駆動モータ下降	②保持用マグネット励磁・ ラッチモータ上昇	③ラッチモータ下降
動作説明図			
駆動機構位置	燃交下限 (+50m)		
ラッチ機構位置			CRデラッチ位置 (-65mm)

【微調整棒ラッチ動作-1】

20

項目	④駆動モータ下降	⑤ラッチモータ上昇	⑥駆動モータ上昇
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置 (-6mm)		下限位置 (0mm)
ラッチ機構位置		通常位置 (0mm)	

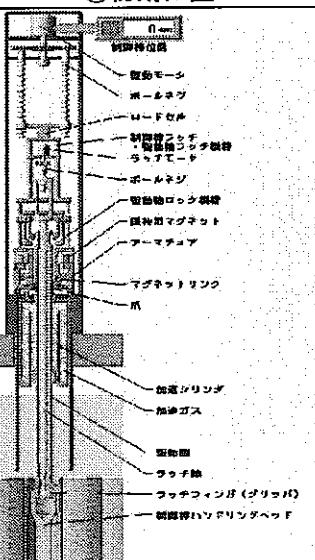
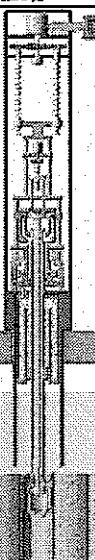
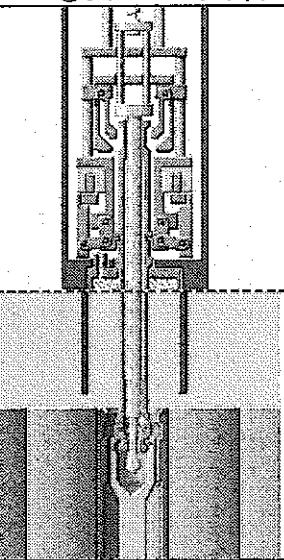
【微調整棒ラッチ動作-2】

21

## 2. デラッチ動作

項目	動作説明	機構位置
①駆動モータ下降	駆動モータにより CR 及び駆動軸を下限リミット点位置 (-6mm) まで挿入する。	駆動機構位置： 下限位置(-6mm) ラッチ機構位置： 通常位置 (0mm)
②ラッチモータ下降	ボールラッチロッドをラッチモータにより通常位置から CR 切離し位置まで約 65mm 挿入することによりラッチ軸が約 20mm 挿入され制御棒ラッチ機構のラッチフィンガーを閉じる。	ラッチ機構位置： CR デラッチ位置 (-65mm)
③駆動モータ上昇	駆動モータを駆動し、駆動軸と CR を燃交下限位置 (50mm) まで引抜く。	駆動機構位置： 燃交下限(50mm)
④ラッチモータ上昇	ラッチモータによりボールラッチロッドを CR 切離し位置から駆動軸ロック位置まで約 80mm 引抜くことにより駆動軸をロックする。	ラッチ機構位置： 駆動軸ロック位置 (15mm)
⑤保持用電磁石無励磁	同上位置にて保持用電磁石を無励磁にする。	
⑥駆動モータ上昇	駆動モータを駆動し、駆動軸を上限位置 (1015mm) まで引抜く。	駆動機構位置： 上限位置(1015mm)

22

項目	①初期位置	②駆動モータ下降	③ラッチモータ下降
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置(0mm)	下限位置(-6mm)	
ラッチ機構位置	通常位置(0mm)	通常位置(0mm)	CRデラッチ位置(-65mm)

【微調整棒 デラッチ動作-1】

23

項目	④駆動モータ上昇	⑤ラッチモータ上昇	⑥保持用マグネット無励磁	⑦駆動モータ上昇
動作説明図				
駆動機構位置	燃交下限位置(+50mm)			上限位置(+1015mm)
ラッチ機構位置		駆動軸ロック位置(+15mm)		

【微調整棒デラッチ動作-2】

24

### 3. スクラム動作

項目	動作説明	機構位置
①スクラム前状態	スクラム前状態 (CR ラッチ引抜き状態)。	
②スクラム信号入力	原子炉安全保護系からの自動信号、もしくは手動スクラム信号によって保持用電磁石が消磁される。	
③駆動軸切離	保持用電磁石の消磁によってアーマチュアが保持用電磁石から切り離され、アーマチュアに連結しているマグネットリンク機構が解放され、駆動軸の最上部が爪から切り離れる。	
④駆動軸 & CR 加速挿入	駆動軸及び CR は一体となって、加速機構の加速シリンダーから供給されるアルゴンガス圧力と自重によって原子炉内へ緊急挿入される。 加速シリンダーは常にアルゴンガス系より加圧されている。(シリンダー圧力: 約 2.5kg/cm <sup>3</sup> )	

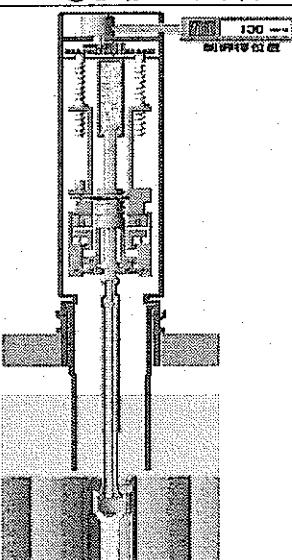
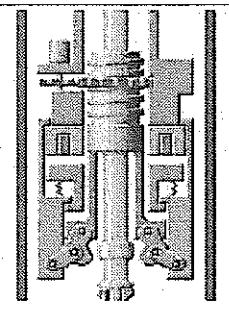
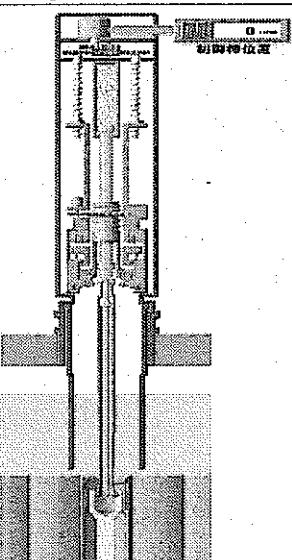
25

## 第4講 粗調整棒駆動機構の動作メカニズム

### 1. ラッチ動作

項目	動作説明	機構位置
①駆動モータ下降	駆動軸を燃料下限位置まで挿入する。これにより、先ずグリッパが制御棒ハンドリングヘッド内に入り、次にグリッパ作動コーンが降りてグリッパを広げ CR と駆動軸の結合が完了する。	駆動機構位置： 燃交下限(130mm) ラッチ機構位置： 駆動軸ロック位置 (-19mm)
②ラッチモータ上昇	ラッチホルダーを上昇させ、操作軸ハンドリングヘッドからラッチ爪を解放させる。	ラッチ機構位置： 通常位置 (0mm)
③駆動モータ下降	ラッチ爪解放状態からラッチ機構部を下降する。	駆動機構位置： 下限位置 (0mm)
④駆動モータ下降	ラッチケーシングが支持筒下端に接触しラッチ爪振りこみが開始される。保持用電磁石とアーマチュアが接触しラッチ振りこみが完了するまでラッチ機構部を下降させる。	駆動機構位置： 最下限位置 (-25mm)
⑤保持用電磁石励磁	ラッチ振りこみが完了した後、保持用電磁石を励磁する。	
⑥駆動モータ上昇	駆動モータを駆動し、駆動軸と CR を引抜く。	駆動機構位置： 下限位置 (0mm)

26

項目	①駆動モータ下降	②ラッチモータ上昇	③駆動モータ下降
動作説明図			
駆動機構位置	燃交下限(+130mm)		下限位置(0mm)
ラッチ機構位置	駆動軸ロック位置(-19mm)	通常位置(0mm)	

【粗調整棒ラッチ動作-1】

27

項目	④駆動モータ下降	⑤マグネット励磁	⑥駆動モータ上昇
動作説明図			
駆動機構位置	最下限位置(-25mm)		下限位置(0mm)
ラッチ機構位置			

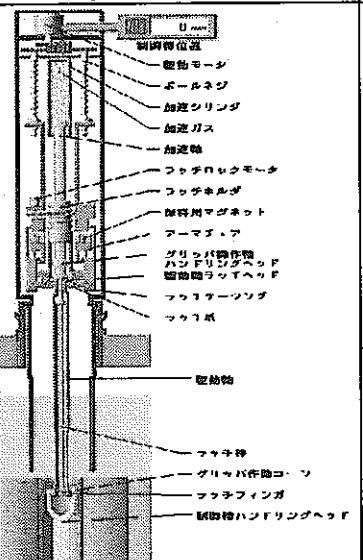
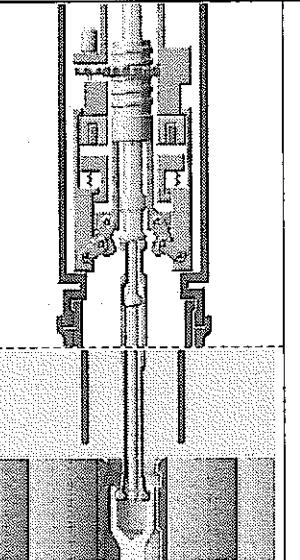
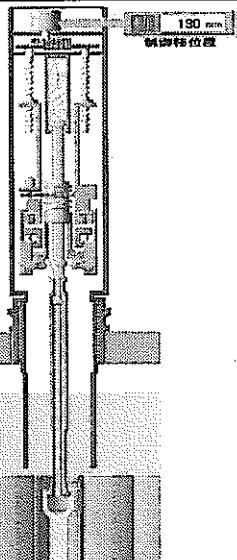
### 【粗調整棒ラッチ動作-2】

28

## 2. ラッチ動作

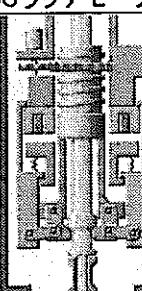
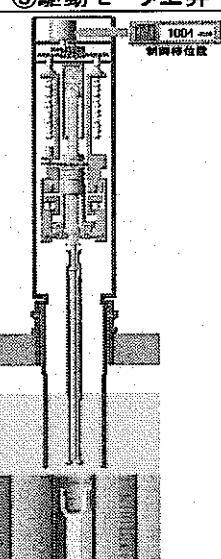
項目	動作説明	機構位置
①駆動モータ下降	駆動モータにより CR 及び駆動軸を插入位置（下限）まで挿入する。	駆動機構位置： 下限位置(0mm) ラッチ機構位置： 通常位置 (0mm)
②保持用電磁石無励磁	同上位置にて保持用電磁石を無励磁にする。ラッチ爪が解放され駆動軸が切離される。	
③駆動モータ上昇	駆動モータを駆動し、ラッチ機構部を燃交換下限位置まで上昇させる。	駆動機構位置： 燃交下限(130mm)
④ラッチモータ下降	ラッチロックモータを回転し、ラッチホルダーを降下させ操作軸ハンドリングヘッドを機械的にラッチ（ラッチロック）する。	ラッチ機構位置： 駆動軸ロック位置 (-19mm)
⑤駆動モータ上昇	ラッチ機構部を上昇させることにより、先ずグリッパ操作軸が上昇してグリッパを解放し、次に駆動軸が上昇して駆動軸と CR を切離す。	駆動機構位置： 下限位置 (0mm)
⑥駆動モータ上昇	駆動モータを駆動し、駆動軸を上限位置 (1004mm) まで引抜く。	駆動機構位置： 上 限 位 置 (1004mm)

29

項目	①初期位置	②保持用マグネット無励磁	③駆動モータ上昇
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置(0mm)		燃交下限(+130mm)
ラッチ機構位置	通常位置(0mm)		

【粗調整棒デラッチ動作-1】

30

項目	④Cラッチモータ下降	⑤駆動モータ上昇	
動作説明図			
駆動機構位置		上限位置(+1004mm)	
ラッチ機構位置	駆動軸ロック位置(-19mm)		

【粗調整棒デラッチ動作-2】

31

### 3. スクラム動作

項目	動作説明	機構位置
①スクラム前状態	スクラム前状態 (CR ラッチ引抜き状態)。	
②スクラム信号入力	原子炉安全保護系からの自動信号、もしくは手動スクラム信号によって保持用電磁石が消磁される。	
③ラッチ爪解放	保持用電磁石の消磁によってアーマチェアが保持用電磁石から切り離され、ラッチケーシングの重量によってラッチ爪が解放される。	
④駆動軸 & CR 加速挿入	ラッチの解放と同時に駆動軸及び CR は一体となって、加速機構の加速シリンダーから供給されるアルゴンガス圧力と自重によって原子炉内へ緊急挿入される。 加速シリンダーは常にアルゴンガス系より加圧されている。(シリンダー圧力: 約 6.0kg/cm <sup>3</sup> g)	

32

## 第5講 後備炉停止棒駆動機構の動作メカニズム

### 1. ラッチ動作

項目	動作説明	機構位置
①駆動モータ下降	駆動モータによるストローク挿入動作によって延長管を挿入する。	駆動機構位置: 下限位置(0mm)
②駆動モータ下降	延長管を全挿入し、フィンガーロッド先端を制御棒ハンドリングヘッドに接触させる。その点から 90mm 挿入すると制御棒ラッチ機構が開き、更に挿入すると保持用電磁石とアーマチェアが接触する。	駆動機構位置: 電磁石励磁許可位置 (-53mm)
③保持用電磁石励磁	駆動部の保持用電磁石を励磁する。	
④駆動モータ上昇	駆動部の保持用電磁石を励磁してラッチ状態を保持した後、延長管を約 50mm 上げると制御棒ハンドリングヘッドとの結合が完了する。	駆動機構位置: 下限位置(0mm)
⑤駆動モータ上昇	駆動モータによるストローク動作により CR を全引抜位置 (1100mm) まで引き抜く。	駆動機構位置: 上限位置 (1110mm)

33

項目	①駆動モータ下降	②駆動モータ下降	③保持用マグネット励磁
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置 (0mm)	マグネット励磁許可位置 (-53mm)	
ラッチ機構位置			

【後備炉停止棒ラッチ動作－1】

34

項目	④駆動モータ上昇		
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置 (0mm)		
ラッチ機構位置			

【後備炉停止棒ラッチ動作－2】

35

## 2. デラッチ動作

項目	動作説明	機構位置
①駆動モータ下降	駆動モータによるストローク挿入動作によりCRを下限位置(0mm)まで全挿入する。	駆動機構位置: 下限位置(0mm)
②保持用電磁石無励磁	上記位置より延長管を挿入し、電磁石とアーマチュアが接触した状態で駆動部の電磁石を消磁する。	駆動機構位置: 電磁石励磁許可位置(-53mm)
③駆動モータ上昇	CRを全挿入位置に残してストローク動作により延長管を全引抜位置(1100mm)まで引き抜く。	駆動機構位置: 上限位置(1110mm)

36

項目	①初期位置	②駆動モータ下降	③保持用マグネット無励磁
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置(0mm)	マグネット励磁許可位置(-53mm)	
ラッチ機構位置	通常位置(0mm)		

【後備炉停止棒デラッチ動作-1】

37

項目	④駆動モータ上昇	⑤駆動モータ上昇	
動作説明図			
駆動機構位置	下限位置(0mm)	上限位置(+1110mm)	
ラッチ機構位置			

【後備炉停止棒デラッチ動作－2】

38

### 3. スクラム動作

項目	動作説明	機構位置
①スクラム前状態	スクラム前状態 (CR 全引抜状態)。	制御棒位置： 全引抜位置 (1100mm)
②スクラム信号入力	原子炉安全保護系からの自動信号、もしくは手動スクラム信号によって保持用電磁石が消磁される。	
③駆動軸切離	保持用電磁石の消磁によってアーマチュアが保持用電磁石から切り離され、自重でフィンガーロッドが 30mm 落下し、制御棒ラッチ機構が閉じて CR (後備炉停止棒) が切離される。	
④CR 加速挿入	CR は加速スプリング力と自重により急速落下して原子炉内に挿入される。	

39

## 【参考資料】

### 遅発中性子

#### (遅発中性子先行核)

核分裂の際に生じる核分裂生成物(F.P)の中には遅発中性子を出して壊れるF.Pがある。これら遅発中性子を発生するF.Pは、エネルギー的に6群に分類されている。

(例) 1群は<sup>87</sup>Br、2群には<sup>137</sup>I、…

<sup>87</sup>Br → (単純β崩壊と遅発中性子を伴うβ崩壊) → <sup>87</sup>Kr → (β-) → <sup>87</sup>Rb (β-) → <sup>87</sup>Sr

#### (遅発中性子発生割合)

第I群の遅発中性子発生割合は $\beta_i$ で表される。従って、第1群から第6群までの全遅発中性子発生割合は、次のようになる。

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

(例) <sup>235</sup>Uの $\beta$ は0.0065である。(即ち、150個の核分裂中性子のうち1個だけが遅れて出てくる割合である。)

では、この遅発中性子はどのような役割効果を果たしているのか? この遅発中性子が存在することにより原子力発電が成立することを次頁以降にて説明する。

40

### 原子炉制御における遅発中性子の効果

#### (遅発中性子が存在しない場合の原子炉制御)

始めに遅発中性子がない場合を考えてみるが、便宜上ここでは無限大の均一炉心と仮定して論議する。

時刻tにおける毎秒1cm<sup>2</sup>当たりの核分裂個数は次式による $N_{F(t)}$ 個で表される。

$$N_{F(t)} = N_{F(0)} e^{t/T} \quad \text{ここで、} N_{F(0)}: t=0 \text{における核分裂個数}$$

T: 原子炉ペリオド(秒)

また、原子炉ペリオドTは $T = l_p / (K_\infty - 1)$ にて求まる。

ここで $l_p$ は即発中性子平均寿命(秒)であり、核分裂で放出されてから吸收・消滅までに要する時間をいう。この $l_p$ は、厳密には減速時間 $t_s$ と拡散時間 $t_d$ の合計時間であるが減速時間 $t_s \ll t_d$ であるので、 $l_p \approx t_d$ と考えて差し支えない。

ここで、臨界状態から $K_\infty$ が0.1%だけ増えた場合を考えてみる。熱中性子炉(<sup>235</sup>U)における $t_d$ は約10<sup>-4</sup>秒であるので原子炉ペリオドは上式より0.1秒の解が得られる。

$$T = 10^{-4} / (1.001 - 1) = 0.1 \text{秒}$$

これより $l_p$ 秒後における核分裂個数は $N_{F(t)} = N_{F(0)} e^{t/T} = N_{F(0)} e^{1/0.1} = N_{F(0)} e^{10}$   
 $e^{10} \rightarrow 2.2 \times 10^4$ 倍であるので、例えば出力1MWの出力が1秒間に22,000MW出力に上昇してしまうことを意味している。ここでは、無限大炉心を想定しているが実際上は有限炉心であり、その場合は $l_p$ はもっと小さいのでペリオドは更に短くなる。

41

### (遅発中性子が存在する場合の原子炉制御)

次に遅発中性子が存在する場合はどうなるかを考えてみる。

遅発中性子の発生割合は $\beta$ （遅発中性子の項参照）であるので、即発中性子の発生割合は $(1 - \beta)$ となる。これより、全中性子の平均寿命 $l$ は次式より求まる。

$$l = (1 - \beta) l_p + \sum_{i=1}^6 \beta_i l_i \quad \text{ここで、} l_p: \text{即発中性子の平均寿命(秒)} \\ l_i: \text{遅発中性子の平均寿命(秒)}$$

遅発中性子の場合、減速時間 $ts$ 、拡散時間 $td$ 、遅発中性子先行核平均寿命 $t_i$ には次の関係があるので、 $l_i \doteq t_i$ と考えて差し支えない

$$ts + td \ll t_i \rightarrow l_i \doteq t_i$$

$$\therefore l = (1 - \beta) l_p + \sum_{i=1}^6 \beta_i t_i$$

<<sup>235</sup>U+水減速の場合を考える>

上記条件の軽水炉における $\sum_{i=1}^6 \beta_i t_i$ は約0.085～0.1秒である。また $l_p$ は約 $10^{-4}$ 秒であるので、合計の全中性子の平均寿命は次の通り約0.1秒となる。

$$l = l_p + \sum_{i=1}^6 \beta_i t_i \doteq 10^{-4} + 0.1 \rightarrow l \doteq 0.1 \text{秒}$$

42

前頁で得られた $l=0.1$ 秒の条件で、先と同様に増倍率 $K_\infty$ が0.1%だけ増加した場合を考えてみると、

$$T = \frac{1}{(K_\infty - 1)} = \frac{0.1}{(1.001 - 1)} = 100 \text{秒}$$

$$N_{F(t)} = N_{F(0)} e^{t/T} = N_{F(0)} e^{1/100}$$

これは即ち出力がe倍もしくは $1/e$ 倍になるまでに100秒を要するということを示しており、十分に制御棒により原子炉出力の制御が可能であることを物語っている。

### 【結論】

1世代の中性子の平均寿命は主に遅発中性子先行核の平均寿命に左右され、その結果として原子炉ペリオドが決定される。高速炉においては、即発中性子の平均寿命が非常に短いので、この傾向はさらに顕著となる。

原子炉への投入反応度量を議論する際に、一般にはセント(¢)という単位が用いられるが、これはどのような反応度量を指しているのか？また、反応度量と「即発臨界」の関係はどのように成り立っているのかを最後に説明する。

43

## 反応度と即発臨界

### (原子炉内の中性子束)

原子炉内の中性子束は次のように即発中性子により得られる中性子束と遅発中性子分による中性子束から成っている。

$$\Phi_{T(t)} = \Phi_{T(0)} [A_1 e^{t/T} + A_2 e^{t/T} + \dots + A_7 e^{t/T}]$$

ここで、 $A_1 e^{t/T}$ :即発中性子寄与分

$A_2 e^{t/T}$ :第1群遅発中性子寄与分

$A_7 e^{t/T}$ :第6群遅発中性子寄与分

ところで、即発中性子分による増倍率割合は $(1 - \beta) K_{eff}$ である。軽水炉の $^{235}U$ 燃料を例にとってみると、 $^{235}U$ の $\beta$ （遅発中性子放出割合）は0.0065であるので、増倍率が0.1%増えた場合の即発中性子による増倍率割合は次のように1.0以下という数値となる。

$$(1 - \beta) K_{eff} = (1 - 0.0065) 1.001 = 0.9945$$

このことは即ち、即発中性子だけでは未臨界であり遅発中性子の助けがなければ臨界には到達しないということを物語っている。

44

### (即発臨界)

#### ◎ $(1 - \beta) K_{eff} < 1.0$ の場合

前頁で述べた通り $(1 - \beta) K_{eff} < 1.0$ の場合は即発中性子分だけでは臨界に到達しない。すなわち、前頁の例をとると99.45%までは急激に中性子束は増加し、その後は遅発中性子分により徐々に増えて臨界に到達する。

#### ◎ $(1 - \beta) K_{eff} > 1.0$ の場合

$(1 - \beta) K_{eff} > 1.0$ の場合は、 $\beta$ が即発中性子発生割合に何の寄与もしていないことが明白である。すなわち、即発臨界である。

以上より即発臨界になるための最低条件は、 $(1 - \beta) K_{eff} = 1.0$ ということが分かる。この $K_{eff} = 1 / (1 - \beta)$ を反応度に当てはめて考えてみると、

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \rightarrow K_{eff} = \frac{1}{1 - \rho} \rightarrow (1 - \beta) \times \frac{1}{1 - \rho} = 1$$

これより、遅発中性子放出割合 $\beta$ に等しい反応度 $\rho$ が投入された場合に即発臨界となることが分かる。この反応度を1ドル(\$)といい、1セント(¢)はその1/100の反応度量を指している。因みに、 $^{235}U$ の $\beta$ は0.0065(0.65%)で、 $^{239}Pu$ の $\beta$ は0.0021(0.21%)である。

以上の参考資料は次の文献より引用・編集したものである。

【出典:ラマーシュ、「原子炉の初等理論」上P130-144、下P627-639、1967年4月、吉岡書店】

45

**付録-3：チャレンジナトリウムクイズ例**

**「ナトリウム基礎実験専門コース」**

## ナトリウム基礎実験専門コース

### 【チャレンジ・ナトリウムクイズ】

—研修前—

所属 : \_\_\_\_\_

氏名 : \_\_\_\_\_

採点 : \_\_\_\_\_ 点

## 【ナトリウム一般】

/10点

### 問題1 次の( )内の空白部に適正な語句、数値を記入せよ。(1点×10問)

- (1)ナトリウムの原子番号は(①)で、原子量(質量数)は(②)である。
- (2)ナトリウムは、軟らかい銀白色で非常に(③)性に富んだな(④)金属である。
- (3)ナトリウムと非常に良く似た性質を持つ金属として(⑤)などが挙げられる。
- (3)ナトリウムは、天然には単独で存在せず(⑥)の形で存在する。
- (5)一般にナトリウムやナトリウムを含むアルカリ性の化合物をソーダと言い、苛性ソーダとは(⑦)のことと称している。
- (6)金属ナトリウムの製造方法としては、主に(⑧)を電解して作る「カストーナ法」と(⑨)を直接電解する「ダウンズ法」とがあるが、近年は(⑩)法が一般的に用いられている。

## 【冷却材としてのナトリウムの特長】

/15点

### 問題2 次の( )内の空白部に適正な語句、数値を記入せよ。(1点×15問)

- (1)「高速中性子と<sup>239</sup>Pu」の組合せによる核分裂は、「熱中性子と<sup>235</sup>U」による核分裂に比べてより多くの中性子を放出するので(①)が可能となる。
- (2)ナトリウムの質量数は中性子に比べて約(②)倍大きいので、核分裂で生じた中性子のエネルギーを余り(③)させない。
- (3)ナトリウムは(④)率が良いので熱効率の高い原子炉運転を行える。
- (4)ナトリウムの融点は大気圧下で約(⑤)℃、沸点は約(⑥)℃であるので、広い温度範囲において单一相(液体)であり、軽水炉のように加圧する必要がない。
- (5)ナトリウムの上述の特性により、高速炉では機器を薄肉構造にできることから(⑦)に対する設計を楽にことができる。また、ナトリウムは单一相であるので(⑧)を得ることが容易であり、崩壊熱除去をより確実に行うことができる。
- (6)ナトリウムは高エネルギー領域で余り中性子を(⑨)しない。
- (7)ナトリウムは、燃料や機器構造物・配管などの金属材料と(⑩)が良く、水に比べて腐食性が弱いので放射線源となる錆を余り生じない。
- (8)ナトリウムは(⑪)が大きいので(⑫)や電磁流量計、誘導式液面計など電磁式機器や計器を活用できる。これにより、機械式機器との併用による多様化が可能となり、原子炉の安全性向上に貢献できている。
- (9)ナトリウムの比重は、常温・大気圧中において水の約(⑬)倍で、温度が高くなるとさらに小さくなり、且つ(⑭)に優れているのでポンプの駆動力が小さくてすむことからポンプを小型化できる。
- (9)ナトリウム資源は豊富であるので比較的(⑮)である。

## 【ナトリウムの化学的性質】

### 問題3 次の( )内の空白部に適正な語句を記入せよ。(2点×10問)

- (1)固体ナトリウムが空気に触れると空気中の酸素や湿気と反応して酸化ナトリウムや(①)などから成る表面皮膜を形成するので急激な反応は生じない。
- (2)ナトリウムを加熱すると約(②)℃前後で表面皮膜が溶融するため、ナトリ

ウム蒸気が空気中出てくる。このナトリウム蒸気は空気中の酸素と混ざって可燃性混合气体を形成し、ナトリウムとナトリウム蒸気との反応熱と保有熱によって混合气体が燃焼し始める（発火）。

- (3)ナトリウムは酸素と反応して主に (③ ) を形成する。しかしこの③は酸素が供給され続けると直ぐに過酸化ナトリウムや湿気を吸って (④ ) に変わる。
- (5)ナトリウムと水が反応すると、(⑤ ) と (⑥ ) ガス、さらに多量の熱を発生する。
- (7)「もんじゅ」では SG 伝熱管が破損した場合に備えて (⑦ ) と SG 内カバーガス中に圧力計が設けられている。圧力計の指示値が、(⑧ ) MPa 以上になったら (⑨ ) がトリップし、プラントは自動停止する。この時併せて水蒸気系も急速ブローされる。また、系統内の圧力が (⑩ ) MPa 以上になると圧力開放板が破裂して系統内圧力を低下させる。

### 【ナトリウムの物理的性質】

/15点

問題4 次の ( ) 内の空白部に適正な語句、数値を記入せよ。(1点×15問)

- (1)ナトリウムの密度は常温で約 (① ) g/cm<sup>3</sup> であるが、温度の上昇とともに (② ) し、「もんじゅ」ホットレグ温度の 529°C では約 (③ ) g/cm<sup>3</sup> である。
- (2)大気圧中のナトリウムの融点は約 (④ ) °C、また沸点は約 (⑤ ) °C である。
- (3)流体の粘性係数とは、流体のせん断力或いはねじり変形に対する抵抗の尺度、すなわち流体の (⑥ ) を表す尺度を意味している。通常は絶対粘性係数を (⑦ ) で除した動粘性係数が用いられる。
- (4)粘性係数は温度に依存しており、温度の上昇とともに (⑧ ) する。すなわち、温度が高いほどポンプの駆動力は (⑨ ) ですむ。
- (5)金属の濡れが生じるか否かの温度を一般には臨界温度と言う。ナトリウムの濡れ特性は、ナトリウム中の (⑩ ) の影響を受ける。
- (6)熱伝導率は、物体を流れる熱流束密度と物体中の温度差の間の (⑪ ) であり、水の約 (⑫ ) 倍である。
- (7)比熱とは、物質 (⑬ ) の温度を (⑭ ) 上昇させるのに必要な熱量であり、水の約 (⑮ ) 倍である。

### 【ナトリウムの核的性質】

/6点

問題5 次の ( ) 内の空白部に適正な語句、科学記号、数値を記入せよ。(1点×6問)

- (1)天然に見られるナトリウムは安定同位元素であり、放射線は放出しない。
- (2)ナトリウムは原子炉内で放射化し放射線を放出する。原子炉の運転中、特に強い放射線を出すのが (① ) である。①は (② ) 反応によって生成される。
- (3)原子炉の保守を行うに当たっては、①の半減期は約 (③ ) であるので特に問題とならないが、(④ ) 反応によって生成される (⑤ ) の半減期は (⑥ ) と長いので徐々に蓄積され、作業員の被ばく放射線源となる。

## 【ナトリウムによる材料の腐食】

/15点

### 問題6 次の( )内の空白部に適正な語句、数値を記入せよ。(1点×15問)

- (1)金属ナトリウムによる腐食機構(メカニズム)は、材料の特定元素の金属ナトリウム中への(① )と(② )によって腐食が進行するものと、材料の特定元素とナトリウム中不純物との化学相互作用によって腐食するという二つに大別される。
- (2)前者は金属ナトリウムの(③ )作用と還元作用によって生じるものである。
- (3)高温部と低温部の温度分布が存在するプラントでは、(④ )部において①現象が生じ、(⑤ )部では①した元素が過飽和となって配管表面などに(⑥ )する。
- (4)ナトリウム中の酸素は材料中の鉄と反応して(⑦ )と酸化ナトリウムから成る表面皮膜を形成し、ナトリウム中に(⑧ )する。従って、酸素量が増えると(⑨ )量が増大する。
- (5)炭素は、微量でも材料の強度特性を大きく左右する元素であり、(⑩ )・侵炭は注意を要する現象である。
- (6)⑩の現象は特に高温部で使用され薄肉構造である燃料被覆管やラッパ管などの炉心材料の設計において注意しなければならない。⑩現象は材料の(⑪ )やクリープ破断強度の低下を招く。
- (7)2次系は異種金属が混在するバイメタリック系である。金属ナトリウムは微量な炭素を溶解するため、バイメタリック系では温度の高い部位で使用される炭素活量の高い(⑫ )鋼が(⑬ )し、温度の低い部位で使用される(⑭ )鋼が侵炭される。侵炭現象は、材料の(⑮ )の低下を招く

## 【ナトリウムの純度管理】

/15点

### 問題7 次の( )内の空白部に適正な語句、数値を記入せよ。(1点×15問)

- (1)ナトリウム中不純物として最も代表的な不純物は酸素である。酸素溶解度は大きく温度に依存し、300°C~400°Cの領域では(① )ppmのオーダーであるが、120°Cでは(② )ppmである。材料の腐食はナトリウム中の(③ )に大きく左右され温度が高いほど腐食量は(④ )する。
- (2)ナトリウム中の不純物酸素は、コールドトラップ(C/T)の温度を低く保持することにより、C/Tの(⑤ )部に酸化物として(⑥ )させ容易に除去することができる。
- (3)(⑦ )は酸素に比較してナトリウム中溶解度は低いが、2次系では無視できない不純物である。2次系においては蒸気発生器(SG)水側伝熱管の腐食で発生する⑦が管壁を拡散しナトリウム側へ移行するからである。
- (4)「もんじゅ」におけるナトリウム純度管理基準は次の通りである。
  - ◆1次系の酸素濃度制限値は(⑧ )ppm以下に設定されている。この制限値はプラント寿命中における構造材料の機械的強度を確保する観点から設定された値である。
  - ◆1次系の酸素濃度管理目標値は(⑨ )ppm以下である。これは、(⑩ )の機械的強度設計において腐食量算定の前提条件として与えられた値であり、1次系C/Tの出口酸素濃度2ppmに余裕をみた値である。
  - ◆2次系の酸素制限値は(⑪ )ppm以下である。また、管理目標値は(⑫ )

ppm に設定されている。これは、不純物によって IHX 伝熱管や SG 伝熱管などの狭隔部が流路閉塞しないようにするために設定された値である。

◆また 2 次系においては水素濃度を (13) ppb 以下に設定している。これは、SG 伝熱管の破損リーク監視においてナトリウム中 (14) 検出器の (15) の関係から定めた値であり、この値を超過した場合は伝熱管破損の疑いがあるとして運転対応がなされる。

### 【ナトリウム取扱関連法規】

/4 点

**問題 8** 次の ( ) 内の空白部に適正な語句、数値を記入せよ。 (1 点 × 4 間)

- (1) ナトリウムは法規上 (①) 類危険物として取扱われる。
- (2) 指定数量以上の危険物を製造所、貯蔵所、取扱所以外の場所で取扱ってはならない。  
ナトリウムの指定数量は (②) である。
- (3) 指定数量の 3000 倍以上の危険物を貯蔵、又は取扱う場合、事業所は危険物業務を総括管理する「危険物保安統括管理者」を定めて市町村に届け出なければならない。
- (4) 危険物保安統括管理者は、取扱う危険物が指定数量の (③) 倍以上となる場合には、甲種又は乙種危険物取扱者免状の交付を受けた者の中から (④) を定めて市町村に届け出なければならない。

以 上