

「高速増殖炉開発の課題」

説明用資料

平成 8 年 4 月 1 日

(社) 日本原子力産業会議
専務理事 森 一 久

世界の原子力発電設備容量

-1995年6月末現在-

(単位: 万kW, グロス電気出力)

| 順位 | 国名 | 運 転 中 | | 建 設 中 | | 計 画 中 | | 合 計 | |
|-----|---------|----------|-----|---------|-----|---------|-----|----------|-----|
| | | 出 力 | 基 数 | 出 力 | 基 数 | 出 力 | 基 数 | 出 力 | 基 数 |
| 1 | 米 国 | 10,474.1 | 109 | 121.1 | 1 | | | 10,595.2 | 110 |
| 2 | フ ラ ン ス | 5,979.3 | 55 | 730.0 | 5 | 303.0 | 2 | 7,012.3 | 62 |
| 3 | 日 本 | 4,053.1 | 49 | 499.7 | 5 | 165.0 | 2 | 4,717.8 | 56 |
| 4 | ド イ ツ | 2,392.0 | 21 | | | | | 2,392.0 | 21 |
| 5 | ロ シ ア | 2,125.6 | 26 | 540.0 | 6 | 749.6 | 13 | 3,415.2 | 45 |
| 6 | カ ナ ダ | 1,669.9 | 22 | | | | | 1,669.9 | 22 |
| 7 | 英 国 | 1,291.5 | 34 | 125.8 | 1 | 486.4 | 4 | 1,903.7 | 39 |
| 8 | ウクライナ | 1,288.0 | 14 | 600.0 | 6 | | | 1,888.0 | 20 |
| 9 | スウェーデン | 1,036.9 | 12 | | | | | 1,036.9 | 12 |
| 10 | 韓 国 | 861.6 | 10 | 510.0 | 6 | 400.0 | 4 | 1,771.6 | 20 |
| 11 | ス ペ イ ン | 740.0 | 9 | 381.0 | 4 | 104.0 | 1 | 1,225.0 | 14 |
| 12 | ベルギー | 580.9 | 7 | | | | | 580.9 | 7 |
| 13 | 台 湾 | 514.4 | 6 | | | 260.0 | 2 | 774.4 | 8 |
| 14 | ブルガリア | 376.0 | 6 | | | | | 376.0 | 6 |
| 15 | ス イ ス | 317.5 | 5 | | | | | 317.5 | 5 |
| 16 | リトアニア | 300.0 | 2 | | | | | 300.0 | 2 |
| 17 | フィンランド | 240.0 | 4 | | | | | 240.0 | 4 |
| 18 | 中 国 | 210.0 | 3 | 120.0 | 2 | 1,397.0 | 14 | 1,727.0 | 19 |
| 19 | イ ン ド | 195.5 | 10 | 188.0 | 6 | 188.0 | 6 | 571.5 | 22 |
| 20 | 南アフリカ | 193.0 | 2 | | | | | 193.0 | 2 |
| 21 | ハンガリー | 184.0 | 4 | | | | | 184.0 | 4 |
| 22 | チ ェ コ | 176.0 | 4 | 194.4 | 2 | | | 370.4 | 6 |
| 23 | スロバキア | 174.0 | 4 | 176.0 | 4 | | | 350.0 | 8 |
| 24 | メ キ シ コ | 135.0 | 2 | | | | | 135.0 | 2 |
| 25 | アルゼンチン | 100.5 | 2 | 74.5 | 1 | | | 175.0 | 3 |
| 26 | スロベニア | 66.4 | 1 | | | | | 66.4 | 1 |
| 27 | ブラジル | 65.7 | 1 | 261.8 | 2 | 811.2 | 6 | 1,138.7 | 9 |
| 28 | オ ラ ン ダ | 53.9 | 2 | | | | | 53.9 | 2 |
| 29 | カザフスタン | 15.0 | 1 | | | | | 15.0 | 1 |
| 30 | パキスタン | 13.7 | 1 | 32.5 | 1 | | | 46.2 | 2 |
| 31 | ルーマニア | | | 330.0 | 5 | | | 330.0 | 5 |
| 32 | イ ラ ン | | | 229.3 | 2 | 152.0 | 4 | 381.3 | 6 |
| 33 | キューバ | | | 88.0 | 2 | 176.0 | 4 | 264.0 | 6 |
| 34 | ト ル コ | | | | | 274.6 | 3 | 274.6 | 3 |
| 35 | エジプト | | | | | 187.2 | 2 | 187.2 | 2 |
| 36 | タ イ | | | | | 100.0 | 1 | 100.0 | 1 |
| 37 | イスラエル | | | | | 55.0 | 1 | 55.0 | 1 |
| 合 計 | | 35,823.5 | 428 | 5,202.1 | 61 | 5,809.0 | 69 | 46,834.6 | 558 |

注1: 順位は運転中の設備容量順を原則とし、順次、建設中および計画中の容量順とした。

主要国のウラン濃縮工場

| 設置者（国名） | 濃 縮 法 | 工場所在地 | 規 模 |
|-------------------------|-------|---|---|
| DOE （アメリカ） | ガス拡散法 | ポーツマス パデューカ | 2 工場合計 約19,200tSWU/年 |
| ユーロディフ （フランス等 5 カ国） | ガス拡散法 | トリカスタン （フランス） | 約10,800tSWU/年 |
| ウレンコ （イギリス・オランダ・ドイツ） | 遠心分離法 | カーペンハースト （イギリス） アルメロ （オランダ） グロナウ （ドイツ） | 約1,000tSWU/年 約1,050tSWU/年 約530tSWU/年 1,000tSWU/年まで 拡張予定 |
| 動力炉・核燃料開発事業団 （日 本） | 遠心分離法 | 岡山県人形峠 | 200tSWU/年 原型プラント |
| 日本原燃株式会社 （日 本） | 遠心分離法 | 青森県六ヶ所村 | 600tSWU/年 逐次増設し、最終的には 約1500tSWU/年にする予定 |

注）SWUは、分離作業単位（Separative Work Unit）の略。ウランを濃縮する際に、必要となる仕事量の単位。

出所：「原子力ポケットブック」ほか

主要国の再処理工場

運転中

| 国名 | 運転者 | 工場所在地 (工場名) | 処理能力 |
|------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|
| イギリス | BNFL (イギリス原子燃料会社) | セラフィールド (B205) (THORP) | 天然ウラン 1,500tU/年 濃縮ウラン 1,200tU/年 |
| フランス | COGEMA (フランス核燃料公社) | マルクール (UP1) | 天然ウラン 400tU/年 |
| | | ラ・アーグ (UP2-800) (UP3) | 濃縮ウラン 800tU/年 濃縮ウラン 800tU/年 |
| 日本 | 動力炉・核燃料開発事業団 | 茨城県 東海村 (東海再処理工場) | 濃縮ウラン 0.7tU/日 |

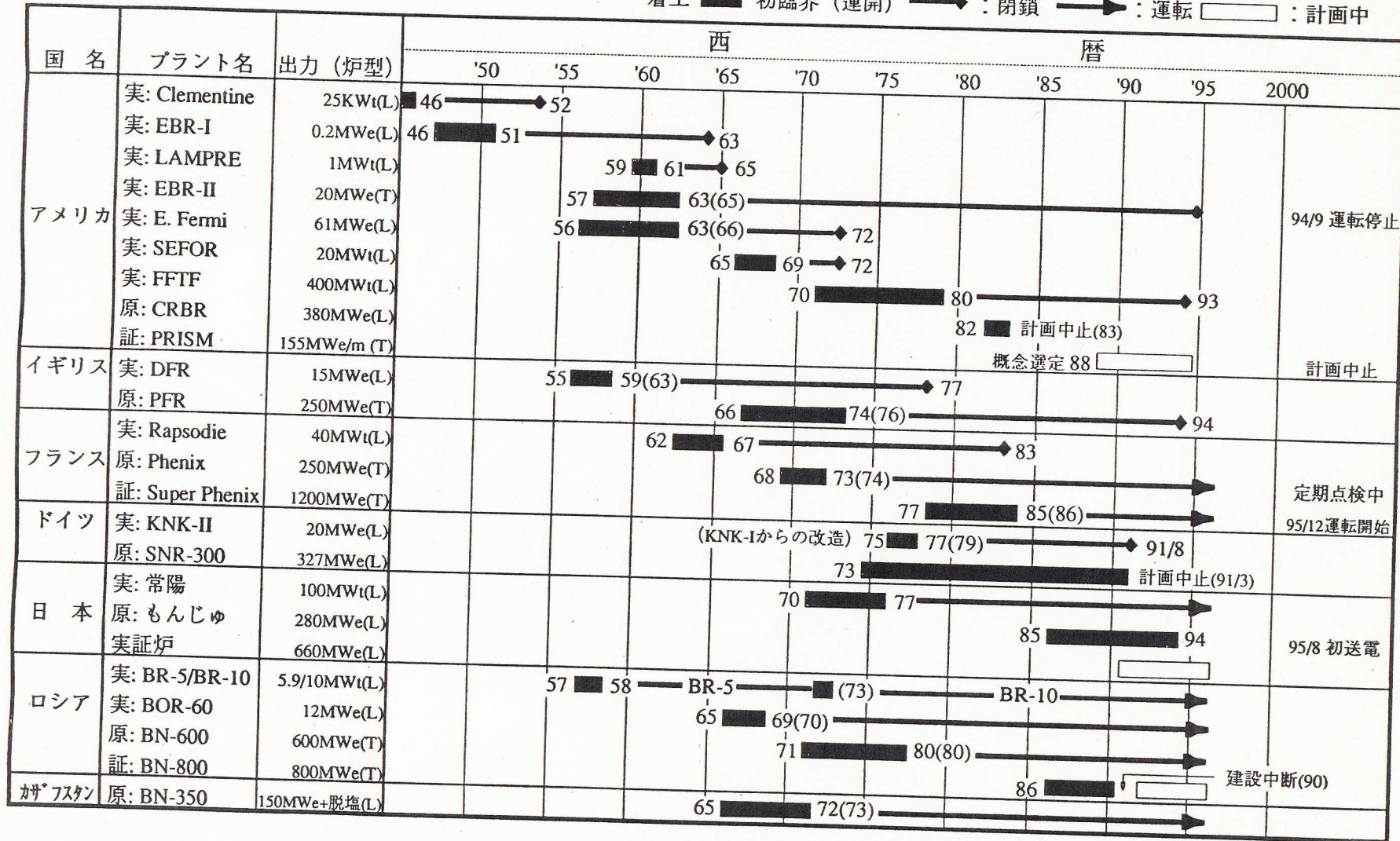
建設中

| 国名 | 運転者 | 工場所在地 | 処理能力 | 操業開始予定 |
|----|----------|---------|------------------|--------|
| 日本 | 日本原燃株式会社 | 青森県六ヶ所村 | 濃縮ウラン 800tU/年 | 2000年頃 |

出所：「原子力ポケットブック」ほか

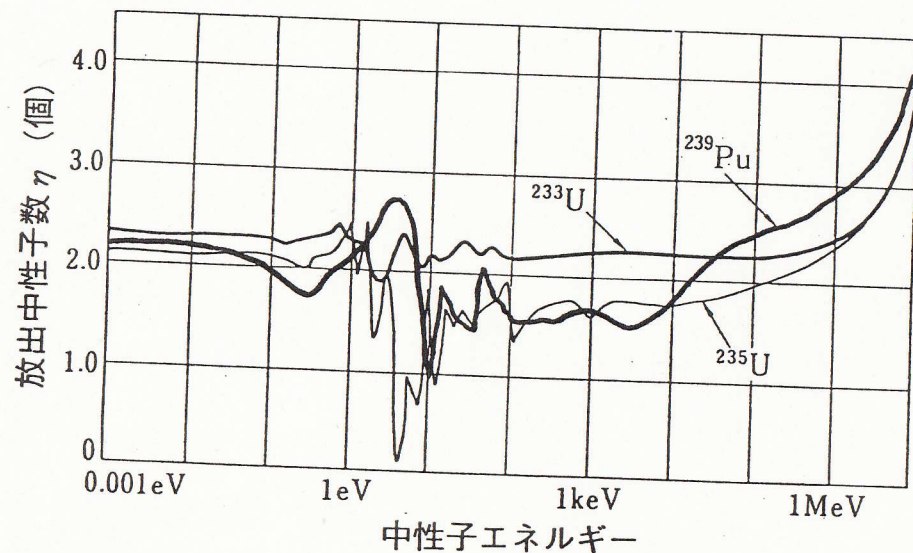
世界の高速炉開発の状況

着工 ■ 初臨界 (運開) —◆— : 閉鎖 —▶— : 運転 □ : 計画中



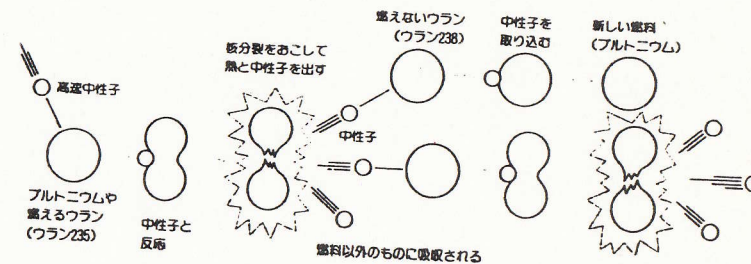
高速炉によるプルトニウムの利用

- ウラン資源の有効利用 $[^{238}\text{U} \xrightarrow{(n, \gamma)} ^{239}\text{U} \xrightarrow[25.3\text{分}]{\beta^-} ^{239}\text{Np} \xrightarrow[2.35\text{日}]{\beta^-} ^{239}\text{Pu}]$
- 高速中性子で ^{239}Pu は核分裂し、高速中性子を平均的に η 個放出する（増殖には η が2.2以上必要）



核分裂当たりの放出中性子数のエネルギー依存性

- ・ ^{238}U への吸収
- ・ ^{239}Pu や ^{235}U の核分裂
- ・漏れや燃料以外の捕獲



増殖のしくみ

高速炉の冷却材

| | 液体金属 (327℃) | | | | ガス (327℃) | | 備考 |
|-------------|-------------|------|------|------|-------------|--------------|-------------|
| | ナトリウム | ナック | 水銀 | 鉛 | ヘリウム | 水蒸気 | 水 |
| | | | | | 10MPa, 327℃ | 7.5MPa, 327℃ | 15MPa, 327℃ |
| 融点 (℃) | 98 | -11 | -38 | 328 | - | - | 0 |
| 沸点 (℃) | 882 | 748 | 357 | 1743 | - | - | 100 |
| 比重 | 0.87 | 0.80 | 12.9 | 10.6 | 0.0079 | 0.033 | 0.66 |
| 熱伝達特性 | ◎ | ◎ | ○ | ○ | △ | × | △ |
| 金属材料との共存性 | ○ | ○ | △ | × | ○ | △ | ○ |
| 中性子の減速能 | 小 | 小 | 小 | 小 | 小 | 中 | 大 |
| 中性子の吸収断面積 | 小 | 小 | 大 | 小 | 小 | 小 | 小 |
| 化学的活性 | 大 | 大 | 小 | 中 | 小 | 小 | 小 |
| 放射化 | 有り | 有り | 有り | 有り | 無し | 無し | 無し |
| 価格 (Naに比べて) | - | 高い | 安い | 安い | 高い | 安い | 安い |
| その他 | | | 毒性 | | | | |

ナトリウムの特長

長所

<核的性質>

○中性子の減速能、吸収が小

<物理的・電氣的性質>

○熱伝達特性が良

○沸点が約880℃と高い（加圧不要）

○比重が小（ポンプ動力が小）

○電氣の良導体（電磁ポンプを使用可）

<化学的性質>

○金属材料との共存性が良

短所

*半減期：約15時間

●放射化 ($^{24}\text{Na}^*$)

●融点が約100℃
（予熱が必要）

●化学的活性が大
（水や空気と反応）

「もんじゅ」の研究開発

— 蒸気発生器及びナトリウム漏えい関連 —

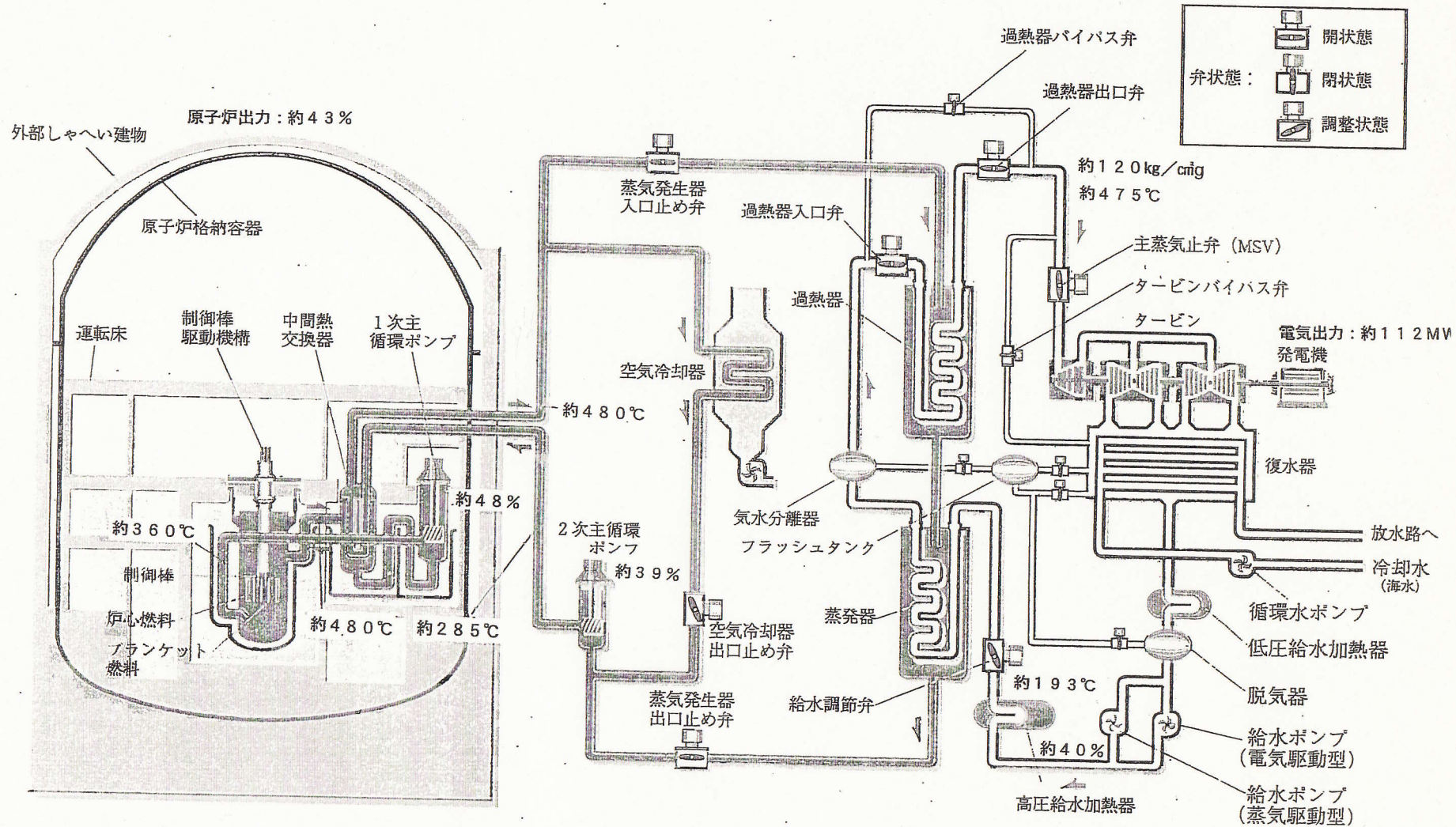
1. 蒸気発生器の研究開発

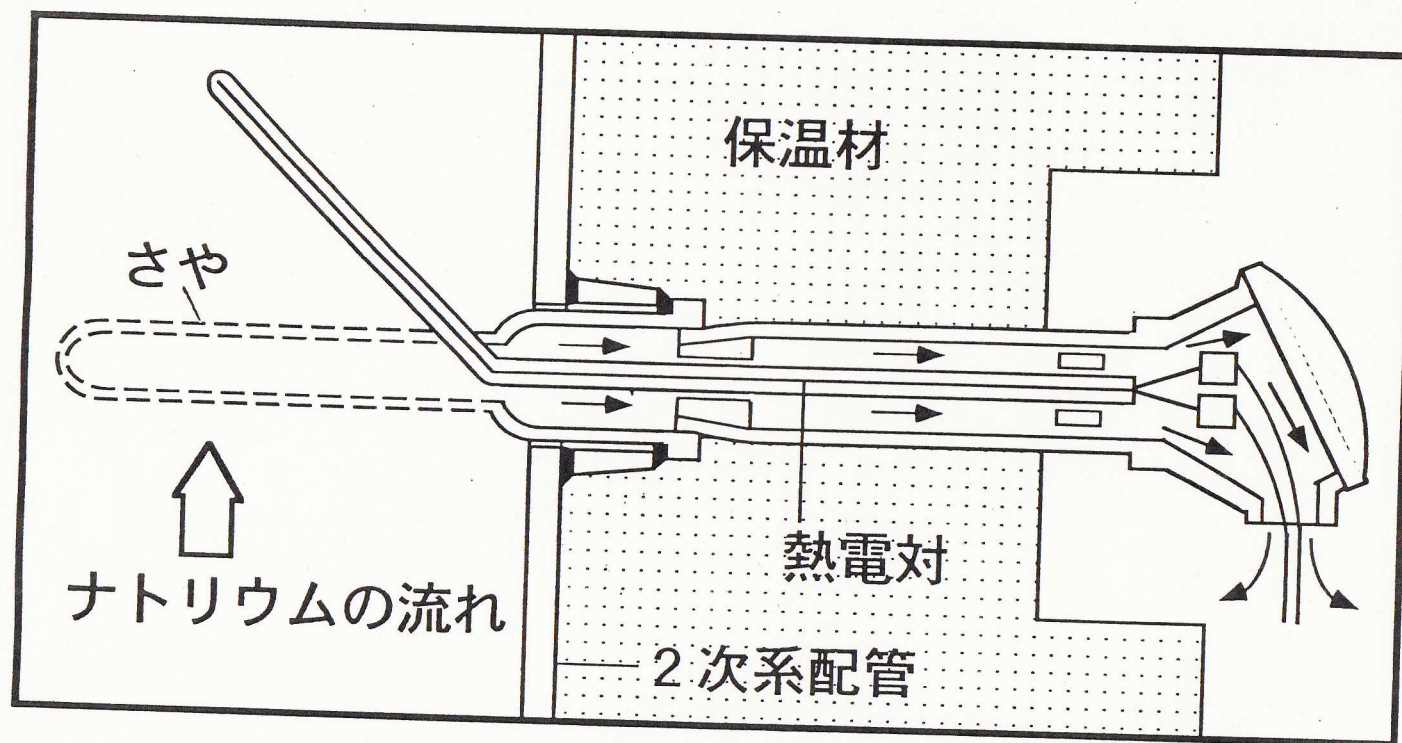
- ・ 1MW小型モデル、50MW大型モデルによる性能及び信頼性確認
- ・ 小リークから大リークまでのナトリウム—水反応試験
- ・ 高感度水漏えい検出システムの研究開発

2. ナトリウム漏えいの試験研究

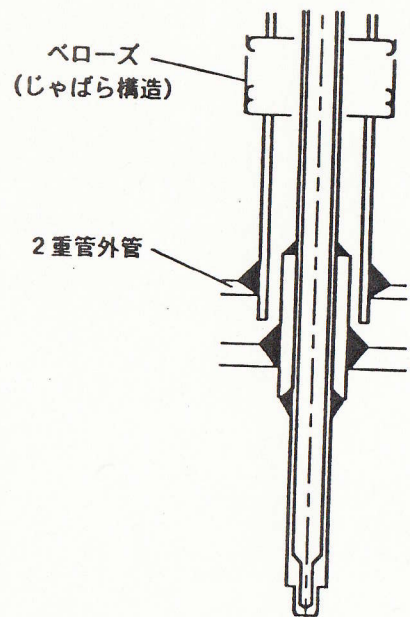
- ・ 「常陽」では18年間の運転でナトリウム漏えいの経験なし
- ・ ナトリウム漏えい燃焼試験
 - ナトリウム漏えい形態の研究
 - ナトリウム燃焼対策の有効性確認
 - ナトリウム燃焼解析コードの改良・整備

2次主冷却系Na漏えい時のプラント状態図

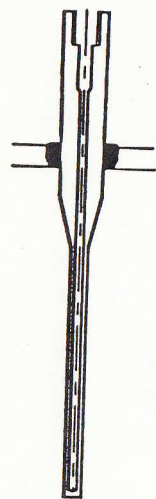




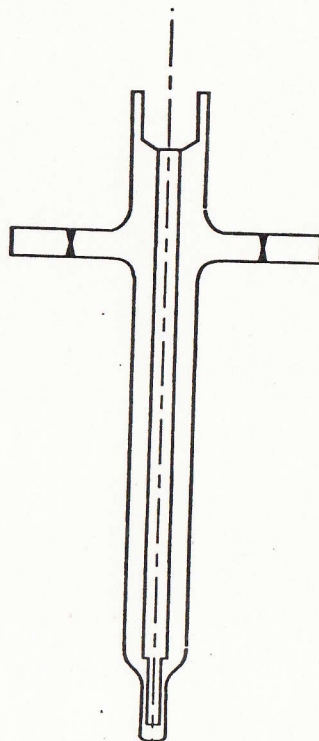
ナトリウム漏えい経路の想定



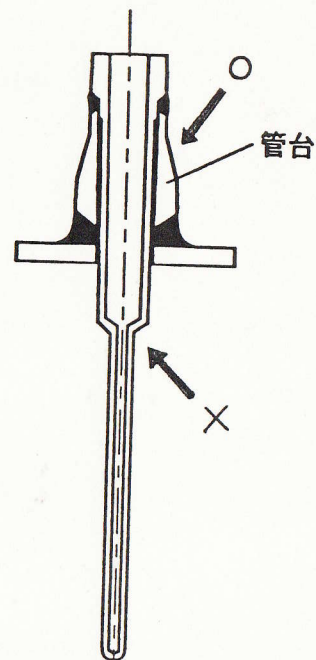
1 次主冷却系



2 次主冷却系



1 次主冷却系



2 次主冷却系

「常陽」

「もんじゅ」

温度計配管部形状比較

先進国における事故・故障とその教訓

| 事故・故障の種類 | | 発生プラント | 主な教訓 |
|----------|-------------------|---|--|
| 蒸気発生器 | 伝熱管破損 (水漏えいなし) | EBR-II (米) BR-5 (口) | 材料選定・構造材料開発 溶接施工法の開発 品質管理の充実 高感度水漏えい検出系開発 Na-水反応対策設備充実 運転管理技術確立 |
| | 小規模水漏えい | PFR (英) Phenix (仏) BN-600 (口) BN-350 (カザフ) | |
| | 大規模水漏えい | E. Fermi (米) PFR (英) | |
| 他 | 1次系Naへの油混入 | PFR (英) | 動的機器の運転信頼性確認 Na純度管理技術確立 |
| | 1次系Naへの空気混入 | Phenix (仏) | |

先進国における事故・故障とその教訓

| 事故・故障の種類 | | 発生プラント | 主な教訓 |
|----------|---------------|---------------------------------------|---|
| 炉心燃料 | 炉心溶融・燃料溶融 | EBR-I (米) E. Fermi (米) | 炉心・燃料安全性確立 運転管理技術確立 燃料用材料開発 |
| | 燃料被覆管破損 | DFR (英) BR-5 (口) | |
| | 反応度低下 (原因調査中) | Phenix (仏) | |
| Na漏えい | 1次系漏えい | DFR (英) Rapsodie (仏) BN-600 (口) | 材料選定・構造材料開発 溶接施工法の開発 品質管理の充実 応力緩和技術の開発 |
| | 2次系漏えい | DFR (英) Rapsodie (仏) Phenix (仏) | |
| | 炉外燃料貯蔵槽 | Super Phenix (仏) | |

ナトリウム漏えい量が公開されている事例

| プラント名 | 発生年月 | 漏えい場所 | 漏えい量 |
|----------------|-----------|----------------|-----------------------|
| スーパ-フェニックス (仏) | 1987年 3 月 | 使用済燃料炉外貯蔵槽 | 約 2 0 m ³ |
| KNK-Ⅱ (独) | 1971年 3 月 | 2 次系ナトリウム加熱ヒータ | 約 0. 5 m ³ |
| BN-350 (カザフ) | 1989年 | 蒸気発生器 | 約 1 m ³ |
| BN-600 (ロシア) | 1993年10月 | 1 次ナトリウム純化系配管 | 約 1 m ³ |
| BN-600 (ロシア) | 不明 | 2 次系ドレン配管 | 約 0. 6 m ³ |
| BN-600 (ロシア) | 不明 | 2 次系主配管弁 | 約 0. 3 m ³ |
| BN-600 (ロシア) | 不明 | 2 次系ドレン配管 | 約 0. 3 m ³ |

海外のプラントでのナトリウム漏洩件数

(アメリカは除く)

イギリス

DFR (実験炉) 7件

PFR (原型炉) 20件

フランス

Rapsodie (実験炉) 2件

Phenix (原型炉) 23件

Super-Phenix (実証炉) 3件

ドイツ

KNK-II (実験炉) 21件

SNR-300 (原型炉) 1件

旧ソ連

BR-10 (実験炉) 19件

BN-350 (原型炉) 15件

BN-600 (原型炉) 27件

合 計 138件

| 認 | 連 絡 等 |
|--|---|
| <p>(信号を確認) を当直長に報告 Na 液位変動なし 漏えいと判断)</p> | <p>19:55 当直長よりプラント第1課長 (P1課長)にボットで連絡 19:55 P1課長より当直長へ電話で確認 19:57 P1課長より原子炉主任技術者及び副所長に電話で状況報告 P1課長は電話にて出力降下操作開始を了解した。 当直長は直員に出力降下を指示した。</p> |
| <p>Na 液位の継続監視</p> | <p>20:16 P1課長から所長へ連絡 20:16 ボットにより、関係者を一斉呼出し 20:16 以降動燃敦賀分室に事業所対策会議設備及び状況確認し、 電話通報を開始。 20:17 自衛消防隊長を招集 20:30頃 P1課長建設所に到着 20:35 福井県 原子力安全対策課へ第1報 (分室より) 20:43頃 科技厅原子炉規制課へ第1報 (分室より) 本社へ第1報 (分室より)</p> |
| <p>号の増加を</p> | <p>20:48 敦賀市 原子力安全対策課へ第1報 (分室より) 20:50 自衛消防隊 (編成・待機) 20:50 県よりもんじゅサイトに向かう旨連絡あり</p> |
| <p>Na 液位の継続監視 を当直長に報告した</p> | <p>20:58 美浜町 企画課へ第1報 (分室より) 21:00 福井県警敦賀警察署・敦賀美方消防本部へ連絡 (分室より) 21:10頃 炉主任よりもんじゅ緊対室へ原子炉手動トリップに移行 する旨連絡 市へ原子炉手動トリップに移行する旨状況報告 21:12 本社安全部長へ連絡 21:13 本社動開本部副本部長へ連絡 21:15 P1課長から安全管理課長へ連絡 21:20 事故発生速報 (第1報) FAX (分室より) 21:20 通産省 北陸支局へ連絡 21:25 環境安全課よりモニタリングポスト・ステーションの値に変化なしとの連絡あり</p> |
| <p>330℃)</p> | <p>21:57 市よりもんじゅサイトに向かう旨連絡あり</p> |
| <p>開始 ：ドレン弁開 き生気室調系停止 了)</p> | <p>22:10 プレス発表 22:10 県職員 現地到着 22:16 事故発生速報 (第2報) FAX 22:25 敦賀市職員 現地到着 22:34 事故速報 FAX</p> |

| 発 生 状 況 | プラント主要操作・現場 |
|--|--|
| <p>12月8日</p> <p>19:47 「IHX C 2次側出口Na温度高」 警報発報</p> <p>19:47 火災報知器作動 2次主冷却系Cループ配管室 : A-446 (他1箇所、総計2箇所)</p> <p>19:48 「C 2次主冷却系Na漏えい」警報発報 (2箇所)</p> <p>19:48-19:57 火災報知器作動 (計14箇所)</p> <p>20:28-20:49 火災報知器作動 (計50箇所、以降略)</p> <p>21:10 Na漏えい発報 (8日中に計6箇所)</p> | <p>19:48 運転員 (3名) が、現場確認に向う (配管室扉(A-446)で煙の発生を確認し 中央制御室に簡単に連絡) (現場制御盤(A-512)に到着しNa漏えい)</p> <p>19:58 運転員が中央制御室に戻り現場状況</p> <p>19:58 2次系C蒸発器及びオーバーフロータンクの (小)</p> <p>20:00 出力降下操作開始 2次系C蒸発器及びオーバーフロータンクの <制御棒挿入操作等停止操作へ></p> <p>20:50 運転員、再び現場に向う 頃 配管室の白煙の増加とNa漏えい信 確認し、中央制御室に連絡</p> <p>21:00 2次系C蒸発器及びオーバーフロータンクの 頃 運転員は中央制御室に戻り現場状況 (中漏えい手順に移行)</p> <p>21:15 発電機解列</p> <p>21:20 原子炉手動トリップ</p> <p>22:27 ドレン操作に向けて温度降下中 (約)</p> <p>22:40 2次主冷却系Cループ ドレン操作開始</p> <p>22:55 2次主冷却系Cループ ドレン開始</p> <p>23:13 2次主冷却系Cループ 配管室蒸気</p> <p>(00:15 2次主冷却系Cループ ドレン完了)</p> |