

# 英国高速増殖原型炉 PFR 蒸気発生器細管キロチン破断事故の教訓 257kw

## 1. 高速増殖炉蒸気発生器の一般的特徴 — PWRと比較して

- 1) 使用流体が液体金属ナトリウム(二次側)と水/水蒸気(三次側、伝熱管内)である。—— Na-水反応対策が必要
- 2) 使用温度が高温度である(表1)。—— 熱応力、熱衝撃対策が必要
- 3) 伝熱管材料に、耐食性と高温強度とが要求される(軽水炉は前者のみ) —— 蒸発器と過熱器に分け、異なる細管材料の採用が一般的である。
- 4) 圧力差が大きい(「もんじゅ」は、設計圧力で  $160 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  (蒸発器),  $129 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  (過熱器)、伊方2号は、 $99 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ )。
- 5) PWRは伝熱と放射能の閉じ込めが目的だが、FBRは伝熱と一次系の保護

## 2. 高速増殖炉用蒸気発生器の種類 (表1, 図1)

(1) 細管形状 —— 軽水炉とちがい、多くの型が模索され、いまだ「必ずしも定まったものとなっていない。—— 未だ開発途上段階(表2)

- 1) U字管型 — PFRのEV, SH, RH, BN-350のSH
- 2) 直管型 — SNR-300のEVの一部, SHの一部
- 3) ヘアピン型 — PXのEV, SH, RH, (モジュール式)
- 4) ヘリカルコイル型 — SPX, SNR-300のEV, SH, RHの各一部, 「もんじゅ」のEV, SH
- 5) ホッケースティック型 — CRBRのEV, SH
- 6) 二重管型 — EBR-IIなど初期のSG。経済性から現在再び脚光
- 7) バイネット型 — BN-350のEV

(2) 蒸気発生器構成 (図2)

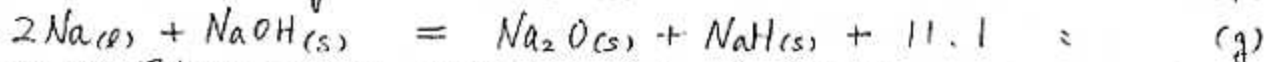
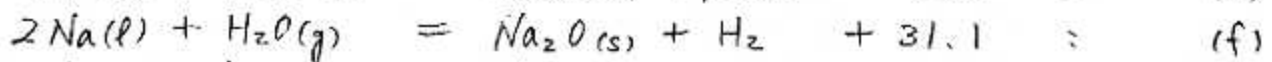
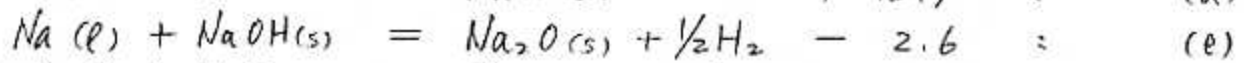
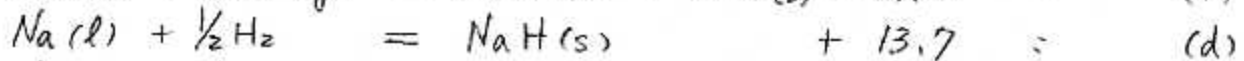
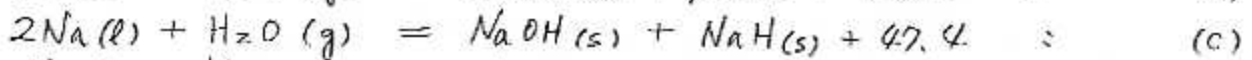
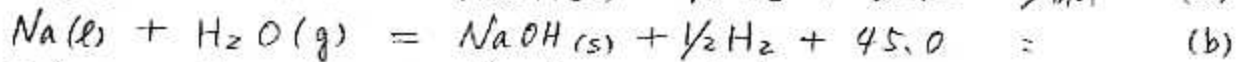
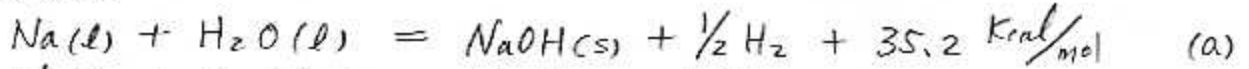
- 1) EV + SH + RH —— PFR, PX, BN-600
- 2) EV + SH —— SNR-300, BN-350, CRBR, 「もんじゅ」
- 3) SG (EVとSHが一体) — SPX

(3) 蒸気発生システム (図3)

- 1) 再循環方式 —— PFR, BN-350, CRBR
- 2) 貫流方式 —— PX, SPX, SNR-300, 「もんじゅ」

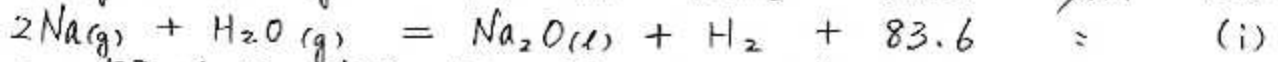
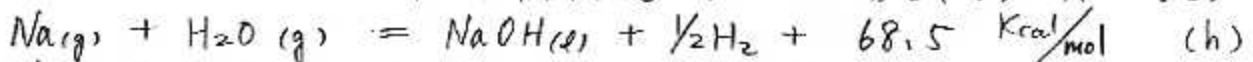
## 3. ナトリウム-水反応

## (1) 起る反応



蒸気発生器運転条件(高温・水側高圧)では、一次反応として(a)または(b)に(c), (f)の反応が混在する。二次反応として(d), (e)および(g)の反応が発生する。(NaOHの融点 = 318 °C)

基本的に、強い発熱反応であり、反応領域に急激な温度上昇をもたらす。この発熱は、更に温度が上がるとNaの沸騰状態で反応した場合、さらに大きくなる。



こうした事実が、PFR事故の拡大に寄与したものと考えられる。

## 4. PFR 蒸気発生系システムと蒸気発生器

(1) PFRの蒸気サイクル — 再熱再循環システム(図3の(b))

(2) PFRの蒸気発生器(事故時) — 蒸発器, 過熱器(以上 図4), 再熱器の構造

(3) PFRの二次ナトリウム系(図5) および 水/蒸気系防護バルブ(図6)

## 5. PFRに備わっている対 Na-水反応安全防護設備

(1) ナトリウム中水素検出器 — もともとトリウム系につながっていたが、事故時、殺されている。

(2) ガス空間水素検出器 — Na中での漏れに対しては時間遅れがある。

(3) 膨張タンク圧力上昇検出装置 — トリウム系につながっている(設定 2.25 atm)。

(4) 圧力破裂板 — 破裂圧 5.67 atm。トリウム系につながっている。

(5) Na-水反応生成物放出・収納設備 — 排出系は、過熱器と再熱器が各一系統づつ、蒸発器には四系統づつ設けられている(一ループ当り計六系統)。(文章の表現と図6とが矛盾している)

## 6. 事故の経過

(25万kWe, 60万kWth)

1987年2月27日、PFRが定格出力で運転していたとき、ループ2の過熱器の破壊板が破裂してナトリウム-水反応によるトリップがかかった。トリップは、プラントから何の前兆もなく9:43:48に発生した。

プラントの事象推移は以下のようなものであった。

- 9:43:44 膨張タンク圧力スイッチのうち一つが、高圧を示した(2アウトオブスリー方式によりトリップがかかる)。
- 9:43:46 過熱器の破壊板の中空部分で水素が検出され、その圧力が上昇した。
- 9:43:48 破壊板の破裂によりナトリウム-水反応トリップが発生した。蒸発器の蒸気側が隔離され、原子炉およびタービンがトリップした。
- 9:43:49 蒸気のダンプが開始され、ナトリウムダンプバルブが開いた。過熱器破壊板の圧力が通常値にもどった。再熱器およびNO.4蒸発器の破壊板中空部分で、高圧およびナトリウムが検出された。過熱器蒸気側の隔離弁が閉じた。蒸発器出口ダンプバルブが開き、二次系ナトリウムポンプがトリップした。
- 9:43:52 蒸発器急速ダンプ禁止圧力スイッチが作動した。排気筒のタフノル板が破裂した。ナトリウム隔離弁が閉じた。NO.2およびNO.3蒸発器の破壊板中空部分で高圧が記録され、そのあとナトリウムが検出された。
- 9:43:54 蒸発器出口ダンプバルブが閉じた。
- 9:43:56 蒸発器低速ダンプ禁止圧力スイッチが作動した。これは、ナトリウム-水反応トリップ中では何かの役に立つものではないが、蒸発器の圧力が0.7MPaに下がったことを示している。
- 9:43:59 過熱器低速ダンプ禁止圧力スイッチが作動した。これは、過熱器圧力が0.7MPaへ下がっていたことを示している。

したがって、自動的な防護動作が10秒以上にわたって有効に完了した。トリップは予期どおりはたらいた。

トリップ後、運転員は停止を完了させるため種々の操作を行った。ループ2では、自動的な作動によって予定どおり隔離が行われていたが、蒸気ドラムがドレインされた。汚染ダンプタンクに流入したナトリウムはわずか約5トンで、タンクの上にあるバルブの温度はわずか76°C(すなわち、ナトリウムの融点より十分低い)を示していた。また、浄化系タンク圧力が増加していたため、ナトリウムのダンプ速度が低下していた。ダンプを完了させるため、手動で浄化系タンクを通気させた。このように、自動的動作は正しく働いたけれど、ナトリウムのダンプを完了させるためには、ダンプラインおよびガス空間通気ラインが閉塞されていたので、手動による介入が必要であった。

蒸気発生器の蒸気側にはアルゴンが注入された。最初、蒸発器でも過熱器でも圧力を上昇させることが出来なかった。蒸気ダンプバルブを手動で閉じた。蒸発器は漏れを通さず過熱器の蒸気側を加圧するとナトリウムのループが加圧されることが分かった。その結果、当日の内に、過熱器で大量の漏洩が起こったことが確認された。浄化系タンクは大量にダンプされたナトリウムを含み、二次系は未知の量の不純物を残したまま、プラントは安定な停止状態へもっていかれた。

- (6) 蒸気発生器の蒸気側隔離とダンフ・バルブ開による蒸気側減圧  
 — Na-水反応の停止と二次系加圧の停止
- (7) ナトリウム隔離と二次ナトリウム・ポンプのトリップおよびナトリウムのダンフ。  
 — IHXへのNa-水反応生成物循環を防ぎ、蒸気側へのNa流出を防ぐ。

## 6. PFRの細管破断に対するDBA

- (1) DBAの変更: 初期 — 蒸発器で1+6 DEGF (最初1本のギロチン破断 → 3秒間で6本のギロチン破断に伝播)。NOAH R.g 試験結果による。  
 その後 — 蒸発器で1 DEGF, 初期破断流  $23 \text{ kg/s}$  スーパー-NOAH R.g 試験結果による。
- (2) DBA時の圧力負荷 (図7, ただしPFRではなく「もんじゅ」の事故解析の図)  
 蒸発器容器 =  $19.7 \text{ atm}$  (設計圧  $34.5 \text{ atm}$ )  
 IHX =  $9.9 \text{ atm}$  ( =  $11.8$  = ) PFR
- (3) 破断流が  $10 \text{ kg/s}$  を超えると「ピストン排除効果」により、他の細管へ破断が伝播しない。過熱器および再熱器の破断では、破断流は  $10 \text{ kg/s}$  以下となり (それぞれ  $3.0, 2.4 \text{ kg/s}$ )、「ピストン排除効果」は通用できない。

## 7. 事故の状況

- (1) 中央ナトリウム入ロダクトを形成している6枚のバッフル板のうち1枚がはがれており、この領域(グリッド6と7の間)の他のバッフル板も変形
- (2) グリッド6と7の間で細管束を二つに切り離した結果、合計40本のギロチン破断が確認された(図8)。 — 縦方向  $3 \sim 4 \text{ cm}$  の大裂口。  
 破断面の多くは中央ダクト側に向いており、はげしく押し曲げられ隣接管の隙間へをすりすり通されていた。
- (3) 破断管のうち4本 (No.15 ~ 18) は、中央ダクト側の面が平らにあり減っていた。
- (4) No.16 破断管に、主裂口と直角の周方向裂け目と、中央ダクトに面して小さなウェスチーザ孔があり、この周方向裂け目が事故の発生と結論された。
- (5) フレッキングは、中央ダクトの縫い目に近く、縫い目からの漏れが細管を振動させ中央ダクトに当たって磨耗したものと結論された。
- (6) ナトリウム側へ放出された水の量は、計算により数十  $\text{kg}$  と考えられた。

## 8. 漏洩経過の解析

- (1) 最初の破断管 (No. 16) に面した中央ダクト面にもウェステージ孔があり、漏洩率  $0.01 \text{ g/s}$  から数時間、 $1 \text{ g/s}$  から 2~3 分のホリーク期間があった。これは、ガス空間水素検出器では検知困難なものである。
- (2) フロントデータ (図 9) から、トリップ前に膨張タンクで圧力上昇があり、20 秒間で約  $10 \text{ kg}$  の水が漏洩したと予想された。これは、毎秒  $0.5 \text{ kg}$  づつステップ状に水の漏洩が増加すると計算した結果とよく合う (図 10)。— 中規模漏洩期
- (3) 中間熱交換器 (IHX) にかかった最大圧力は、計算により最確値として  $10.4 \text{ atm}$  上限値 (悲観的仮定) として  $11.3 \text{ atm}$  と予想された。(設計値  $11.8 \text{ atm}$ ) (図 11, 図 12)
- (4) 破断細管の大部分が、まだ圧力のかかった状態で破断していたことから、二次破断はトリップ直後に発生したとは明らかである。
- (5) 水の放出率は最大  $18 \text{ kg/s}$  と計算され、DBA の仮定 ( $23 \text{ kg/s}$ ) 以下である。

## 9. 破断伝播のメカニズム

- (1) 本事故における水の放出率は、どの段階でも事故解析 (DBA) 時の仮定を下回っていた。にもかかわらず、損傷規模は、予想を大幅に上回った。もし、細管破断が蒸発器で起こっていれば、水の放出率は、DBA の仮定量の少なくとも一倍は多くなったと考えられる。→ 破断メカニズムの見直しは要
- (2) 反応ジェットの中のある程度の温度は、主に反応物のモル比と圧力によって支配される (図 13)。ジェットの中の酸化トリウムが多いため強い腐食環境のときは  $1150^\circ\text{C}$  くらいと考えられ、ジェット内の高温部では  $1450^\circ\text{C}$  にも至ったと考えられる。
- (3) 腐食による破断の可能性 — ウェステージや粒界腐食が破断したとしては、時間が早すぎることに、金属組織の観察から (結晶粒が大きい)、亀裂が発生する (粒界分離) 前に、結晶が成長していたことから、腐食が原因ではない。
- (4) 過熱により機械的強度が著しく低下したことが原因
  - 1) 破断管が、いすれもかなり塑性歪を示していること。
  - 2) ウェステージによる材料欠損が重大でないこと。
  - 3) 破断管の結晶の大きさを、既知の温度条件にさらし焼鈍した同じ細管材料のものと比較することによって、事故中に各細管が受けた最高温度を求めると、 $1100 \sim 1300^\circ\text{C}$  以上に達していたことがわかった。試料の一部を独おび

フランスでも同様の調査を行ない、高温にさらされたことが結論された。

- 4) 破断に到る所要時間が温度によってどう変わるか破断試験によって調べ、同じ圧力で高温になりにつれ免済時間は短くなることが確認された。  
(130バール, 1100°Cでは130秒, 1300°Cでは直ちに破断, 70バールで10秒)
- 5) 破断管を4つのカテゴリーに分類(図14)。加圧した管の温度急上昇実験により各パターンを実証。
- 6) 約半数の細管が1000°C以上になり、約3分の1は1220°Cに達していた(非破断細管の)。

以上から、結論は次のようになる。

- (a) 細管の破損は、1300°Cまでの高温に過熱された結果起こった。
- (b) カテゴリー1および2型破断は低温高圧状態と関連づけられ、したがって、事故初期に起こったものである。
- (c) カテゴリー4型破断は高温低圧状態で起こり、したがって、水蒸気減圧期間のおわり頃に起こった。これらの細管は、事故初期に高温を経験し得なかった。
- (d) 破断しなかった多数の細管(約半数の細管)も高温を経験したが、それは、事故中でも蒸気圧力の低下した段階でのことであらう。

## 10. 破断規模はなぜ予想より大きかったのか？

スーパー-NOAH装置における実験では、できるだけ運転中の蒸気発生器に近い状態を模擬するよう多大の努力が払われた。しかし、この実験で模擬できず二次系ループへ適用するには不十分と思われる重要な特徴が一つある。それは、事故のどの段階にもその前兆となる重要な現象があるということである。このことは、本過熱器事故においてまさしくそうであった。各段階につき順にみていくと、

- (a) 小リーク段階：この段階は、中心バッフルにウェステージ孔を生ずるに必要な十分な時間続いた。この大きさの小リークは二次的な破断を起こすと考えられていた。それが起こらなかったのは、破断の前触れが中心バッフルのフレッチングであって、漏れの方向が細管束と異なる側であったからである。
- (b) 圧力増加をもたらす初期欠陥の成長：初期欠陥は、大きさを広げながら中規模漏洩に到る。トリップが働く直前か多分直後に、過熱による次の破断が起こった。これらの細管は、中心バッフルによるフレッチング、すなわち前兆のために著しく弱くなっていた。
- (c) 停止動作中のさらなる細管の破断：漏洩率が增加するにつれて大漏洩条件に近づくが、しかし細管はやはり破断しつづけた。これら細管の内若干は、事故の中規模漏洩段階中から加熱されはじめていたであろう。しかし、最後の方は比較的低下で破断しており(カテゴリー4型破断)、事故初期の高温を経験し得ないことが冶金学的に証明されている。

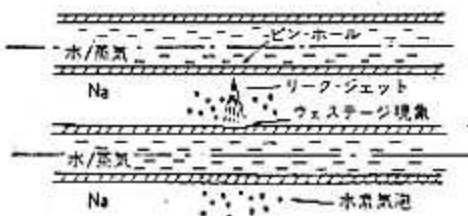
収束動作作動中に、水蒸気、ナトリウム両方の流れを停止させる結果として細管の冷却も停止されるが、このことが細管を高温にしてしまう事態につながったであろう。もちろん、これは実験で模擬されていた。しかし、通常運転中も事故時も、過熱器中のナトリウ

△側圧力は漏洩実験時より高かった（5バール以上、1バールと比較）というさらなる事実がある。

結論として、事故の伝播はこれまでの実験結果と矛盾している。しかも、事故の各段階の条件は、次の段階の破損の引き金になる前触れとなって、予想されてたよりもさらに極限的であった。予想が実際の事故と違った理由は、事故の各段階の効果を非カタストロフィックとしたためである。重要な点は、各段階を分離して考察する手法では不十分で、事故進行の全体論的見方が必要だということである。

## 11. 従来の蒸気発生器細管損傷に対する取扱い。

(1) 漏洩率により分類する。



SGにおけるナトリウム-水反応現象

表1 リーク規模分類

リーク分類	主な現象	境界リーク率
微小	セルフ・ウェステージ	10 <sup>-1</sup> g/sec
小	ターゲッド・ウェステージ	
中	マルチ・ウェステージ	10 g/sec
大	熱流動現象	2 kg/sec

(2) 漏洩率とウェステージ率（ウェステージ深さ/時間）の関係を模擬実験装置で定める。

(3) 各リーク分類での問題点を調べ、対策を講じる。また、DBAを決める。

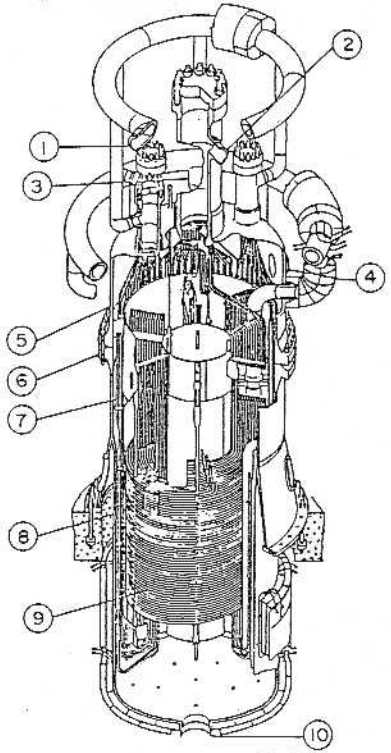
## 12. 「もんじゅ」のDBAとその問題点

## 参考文献

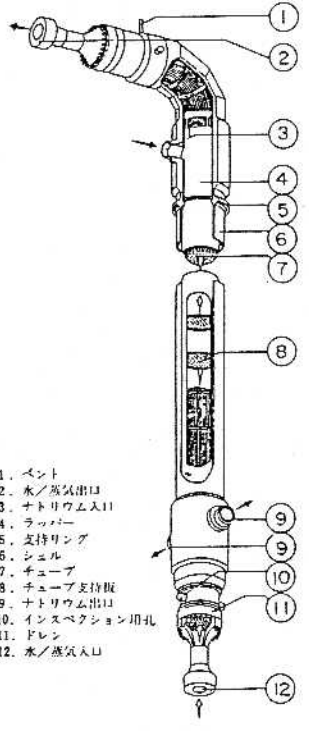
- (1) 中井靖：原子力工業、第23巻、第2号、27-34 (1977)
- (2) 鈴木庸一 他：日本原子力学会誌、Vol.17, No.10, 527-535 (1975)
- (3) 土屋毎雄：同上 Vol.25, No.5, 320-328 (1983)
- (4) 福田達：原子力工業、第31巻、第1号、64-72 (1985)
- (5) 田辺裕美 他：同上、第34巻、第1号、69-76 (1988)
- (6) 亀井満 他：同上 第33巻、第1号、69-76 (1987)
- (7) 古川和男：同上 第14巻、第4号、67-79 (1968)
- (8) 同：同上 同 第5号、70-72 (同)
- (9) 同：同上 同 第11号、61-64 (同)
- (10) 根井弘道：同上 第35巻、第4号、51- (1989)
- (11) 火力原子力発電、Vol.43, No.7, 867-, (1992)
- (12) 和田雄作：原子力工業、第36巻、第3号、69- (1990)
- (13) 安保秀雄：同上、第38巻、第12号、33- (1992)
- (14) 二瓶勲：同上、第33巻、第3号、67- (1987)
- (15) 動燃技報：No.73、63- (1990)
- (16) M.Hori：Atomic Energy Review, Vol.18, No3, 707-778 (1980)
- (17) C.C.Addison：The Chemistry of the Liquid Alkali Metals
- (18) H.U.Borgstedt et al.：Applied Chemistry of the Alkali Metals, Plenum Press, New York (1987)
- (19) J.A.Bray：Experimental Studies on Sodium/water Reaction in Steam Generators
- (20) 難波務：原子力資料情報室通信、No.193, 8- (1990. 8. 30)
- (21) P.R.Gallie et al.："The PFR Superheater Under Sodium Leak", LIMET'88, 701 (1988)
- (22) C.M.Robertson et al.："The Leak in Superheater 2-PFR February 1987", ibid 712 (1988)
- (23) C.V.Gregory, "Operating Experience with the Prototype Fast Reactor at Dounreay", FR-91, 5.3-1 (1991)
- (24) R.Currie et al.："The Under Sodium Leak in the PFR Superheater 2 in February 1987", IAEA IWGFR, 107- (1990)
- (25) R.Currie et al.："The Experimental and Engineering Programms to Support the PFR Safety Case Following the Superheater 2 Under Sodium Leak: Particular, Large Scale Experiments in the Super Noah Rig at Dounreay", ibid, 81- (1990)
- (26) J.K.Stanley et al.："Grain Growth in Austenitic Stainless Steels", Metallography, 2, 349- (1969)

表1 世界のSGの仕様一覧表 (1)

SG		BN-350 (ソ連)	PFR (イギリス)	SNR-300 (西ドイツ)	Phenix (フランス)	Super Phenix (フランス)	CRBR (アメリカ)	もんじゅ (日本)	高浜3号 (巻)	
蒸 発 器	熱出力 (MW/セット) 流動方式	200 再循環	200 再循環	85.6 貫流	138 貫流	750 貫流	325 再循環	238 貫流	887 貫流	
	型式	パイオネット型	U字管型並行流	直管型	ヘリカル コイル型	モジュラー ヘアピン型	ヘリカルコイ ル型	ホッケーステ ル型	ヘリカルコイ ル型	U字管型
	熱出力 (MW/基) 基数 (基/loop) × loop数	— 2 × 6	104 1 × 3	55.4 2 × 3   1 × 3	9.9 12 × 3	750 1 × 3	118 2 × 3	163.4 1 × 3	1 × 3	1 × 3
	胴材質	—	—	950	1400	SUS304TP 2900	2 1/2 Cr-1Mo 1320.8(52in)	2 1/2 Cr-Mo 2760	2 1/2 Cr-Mo 2760	合金鋼 3400~4500
	外径 (mm)	—	—	950	1400	2 1/2 Cr-1Mo	2 1/2 Cr-1Mo	2 1/2 Cr-1Mo	2 1/2 Cr-1Mo	インコネル600
	伝熱管材質	2 1/2 Cr-1Mo	2 1/2 Cr-1Mo -Nb	17.2 × 26.9 × 2.0t	2.9t	2 1/2 Cr-1Mo -Nb	インコネル800	2 1/2 Cr-1Mo	2 1/2 Cr-1Mo	22.2 × 1.3
	外径 × 厚み (mm)	32 × 2t	25 × 2t	17.2 × 26.9 × 2.0t	2.9t	28 × 4t	25 × 2.6t	15.9 × 2.8t	25 × 2.8t	22.2 × 1.3
	本数 (本)	816	498	211	77	7	357	757	150	3382
	層数 (層)	—	—	—	—	—	—	—	16	—
	全長 (m)	—	—	—	—	—	約87	—	—	—
	本体全長 (m)	—	—	—	—	—	22	19.8	13	21
	本体重量 (ton)	—	—	—	—	—	150	82	—	—
	ナトリウム流量 (kg/h)	3.26 × 10 <sup>6</sup>	3.504 × 10 <sup>6</sup>	1.305 × 10 <sup>6</sup>	2.65 × 10 <sup>6</sup>	1.176 × 10 <sup>7</sup>	2.883 × 10 <sup>6</sup>	3.5 × 10 <sup>6</sup>	1.52 × 10 <sup>7</sup>	1.52 × 10 <sup>7</sup>
	給水流量 (kg/h)	—	1.498 × 10 <sup>6</sup>	1.46 × 10 <sup>6</sup>	2.51 × 10 <sup>6</sup>	1.22 × 10 <sup>6</sup>	5.04 × 10 <sup>5</sup>	3.5 × 10 <sup>5</sup>	—	—
	ナトリウム入口温度 (°C)	420	455	454	475	525	458	449	—	—
出口温度 (°C)	265	370	355	350	345	344	325	—	—	
給水/蒸気入口温度 (°C)	158	288	253	246	235	284	240	—	—	
蒸気出口温度 (°C)	—	353	357	375	490	327	369	—	269	
蒸気出口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	—	174	179.5	172.6	182	102(1450psig)	160	165	54.5	
伝熱面積 (m <sup>2</sup> /基)	820	—	220.8	263.8	26.7	1920	1340	1340	4780	
熱通過率 (KW/m <sup>2</sup> )	—	—	251	210	372	390	122	122	—	
						(蒸発器・過熱器の一体型)		(3種類の設計をしておりそのうちの1例を示す)	(申請書あり)	
過 熱 器	型式	U字直管型並行流	U字直管型並行流	直管型	ヘリカル コイル型	モジュラー ヘアピン型	ホッケーステ ル型	ヘリカルコイ ル型	—	
	熱出力 (MW/基) 基数 (基/loop)	— 1 × 6	68 1 × 3	30.1 1 × 3	3.36 12 × 3	90 1 × 3	41.4 1 × 3	—	—	
	胴材質	—	—	950	1400	SUS 321	2 1/2 Cr-1Mo 1320.8	SUS 304	—	
	外径	—	—	950	1400	2 1/2 Cr-1Mo	2 1/2 Cr-1Mo	—	—	
	伝熱管材質	2 Cr-Mo	SUS 316H	10Cr Mo Ni Nb	—	SUS 321	2 1/2 Cr-1Mo	—	—	
	外径 × 厚み (mm)	16 × 2t	16 × 2t	17.9 × 26.9 × 2.9t	4.5t	31.8 × 3.6t	15.9 × 2.8t	—	—	
	本数 (本)	805	809	211	77	7	757	150	—	
	層数 (層)	—	—	—	—	—	—	14	—	
	全長 (m)	—	—	—	—	—	19.8	—	—	
	本体全長 (m)	—	—	—	—	—	82	—	—	
	本体重量 (ton)	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ナトリウム流量 (kg/h)	—	2.46 × 10 <sup>6</sup>	1.305 × 10 <sup>6</sup>	1.46 × 10 <sup>6</sup>	5.769 × 10 <sup>6</sup>	3.7 × 10 <sup>6</sup>	—	—	
	蒸気流量 (kg/h)	2.76 × 10 <sup>6</sup>	3.0 × 10 <sup>6</sup>	1.384 × 10 <sup>6</sup>	2.51 × 10 <sup>6</sup>	5.04 × 10 <sup>5</sup>	3.8 × 10 <sup>5</sup>	—	—	
	ナトリウム入口温度 (°C)	450	532	520	550	502	458	—	—	
	出口温度 (°C)	420	455	455	475	458	449	—	—	
蒸気入口温度 (°C)	—	353	357	375	327	367	—	—		
蒸気出口温度 (°C)	435	514	500	512	485	487	—	—		
蒸気出口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	50	169(2400psia)	16	166	14.5	133	—	—		
伝熱面積 (m <sup>2</sup> /基)	455	—	167.2	199.9	231	480	—	—		
熱通過率 (KW/m <sup>2</sup> )	—	—	180	151	—	86	—	—		
						(蒸発器・過熱器の一体型) 蒸発器側参照		(3種類の設計をしておりそのうちの1例を示す)		
再 熱 器	型式	—	U字直管向流	—	モジュラー ヘアピン型	—	—	ヘリカルコイ ル型	—	
	熱出力 (MW/基) 基数 (基/loop) × loop数	—	28 1 × 3	—	2.39 12 × 3	—	—	33.2 1 × 3	—	
	胴材質	—	—	—	—	SUS 321	—	SUS 304	—	
	外径	—	—	—	—	2760	—	2760	—	
	伝熱管材質	—	SUS 316H	—	—	SUS 321	—	—	—	
	外径 × 厚み (mm)	—	21 × 1t	—	—	42.4 × 2t	—	—	—	
	本数 (本)	—	—	—	—	7	—	—	—	
	層数 (層)	—	—	—	—	—	—	—	—	
	全長 (m)	—	—	—	—	—	—	—	—	
	本体全長 (m)	—	—	—	—	—	—	—	—	
	本体重量 (ton)	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ナトリウム流量 (kg/h)	—	1.044 × 10 <sup>6</sup>	—	1.03 × 10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	
	蒸気流量 (kg/h)	—	2.05 × 10 <sup>6</sup>	—	2.23 × 10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	
	ナトリウム入口温度 (°C)	—	532	—	550	—	—	—	—	
	出口温度 (°C)	—	455	—	475	—	—	—	—	
給水/蒸気入口温度 (°C)	—	305	—	308	—	—	—	—		
蒸気出口温度 (°C)	—	516	—	512	—	—	—	—		
蒸気出口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	—	32.5(462psia)	—	34.4	—	—	—	—		
伝熱面積 (m <sup>2</sup> /基)	—	—	—	18.5	—	—	—	—		
熱通過率 (KW/m <sup>2</sup> )	—	—	—	129	—	—	—	—		
		非再熱	Na 再熱	非再熱	Na 再熱	非再熱	非再熱	Na 再熱	(3種類の設計をしておりそのうちの1例を示す)	

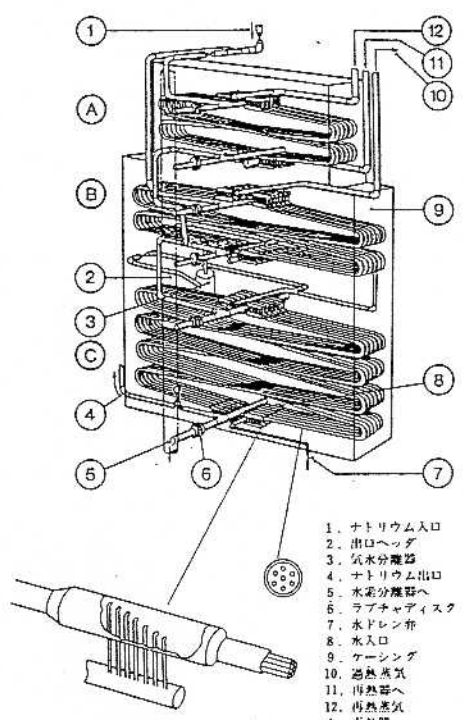


- 1. 水/蒸気入口
  - 2. 蒸気出口
  - 3. ナトリウム入口
  - 4. 放出ノズル
  - 5. 上部製
  - 6. 本体フランジ
  - 7. 下降管
  - 8. 下部製
  - 9. ヘリカルコイル形伝熱管
  - 10. ナトリウム出口
- ヘリカルコイル形(もんじゅ)



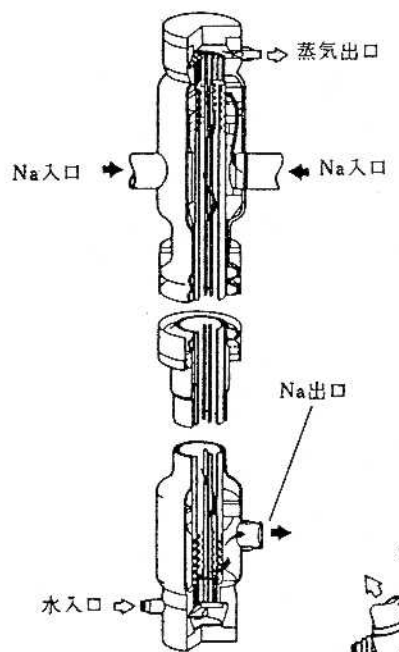
- 1. イント
- 2. 水/蒸気出口
- 3. ナトリウム入口
- 4. ラッパ
- 5. 支持リング
- 6. シューブ
- 7. チューブ支持板
- 8. ナトリウム出口
- 9. インスペクション用孔
- 10. ドレン
- 11. 蒸気入口
- 12. 水/蒸気入口

直管形 (CRBRP)

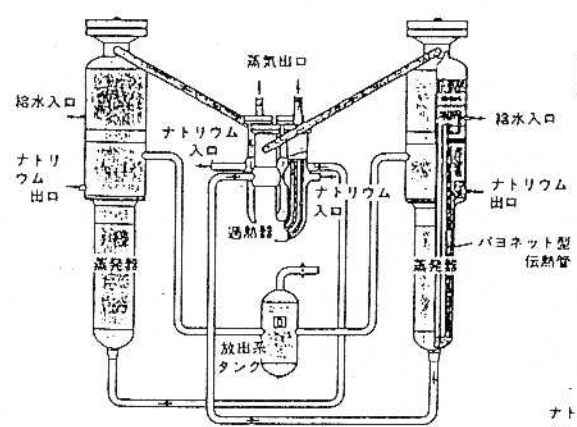


- 1. ナトリウム入口
- 2. 出口ヘッド
- 3. 汽水分离器
- 4. ナトリウム出口
- 5. 汽水分离器へ
- 6. ラブチューブ
- 7. 水ドレン弁
- 8. 水入口
- 9. ケーシング
- 10. 過熱蒸気
- 11. 再熱蒸気
- 12. 再熱器
- A. 再熱器
- B. 過熱器
- C. ニコノマイザー蒸発器

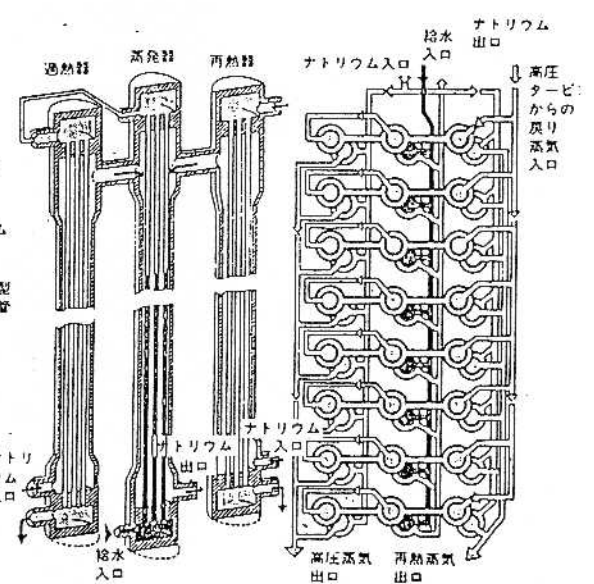
ヘアピン形(フェニックス)



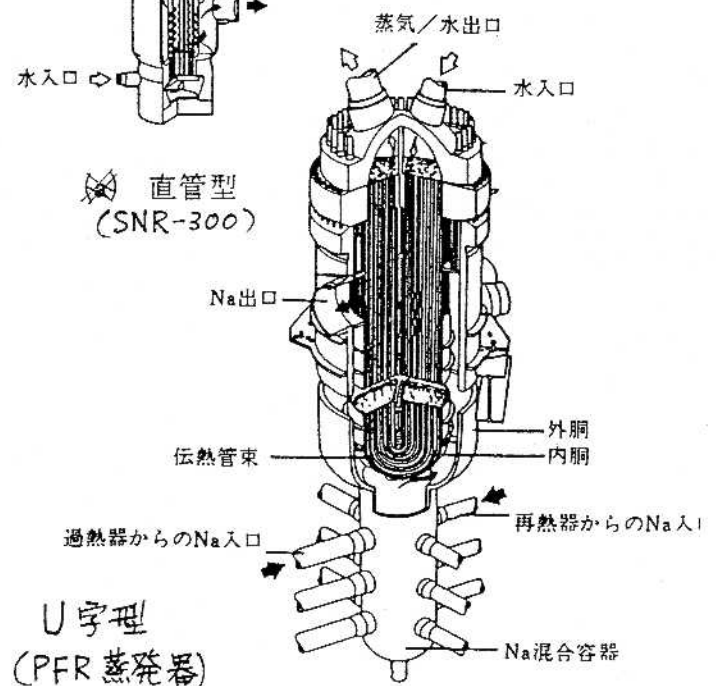
直管型 (SNR-300)



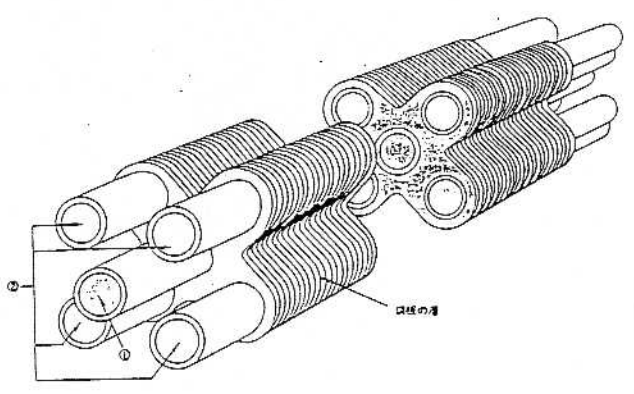
バヨネット型 (BN-350)



(BN-600)

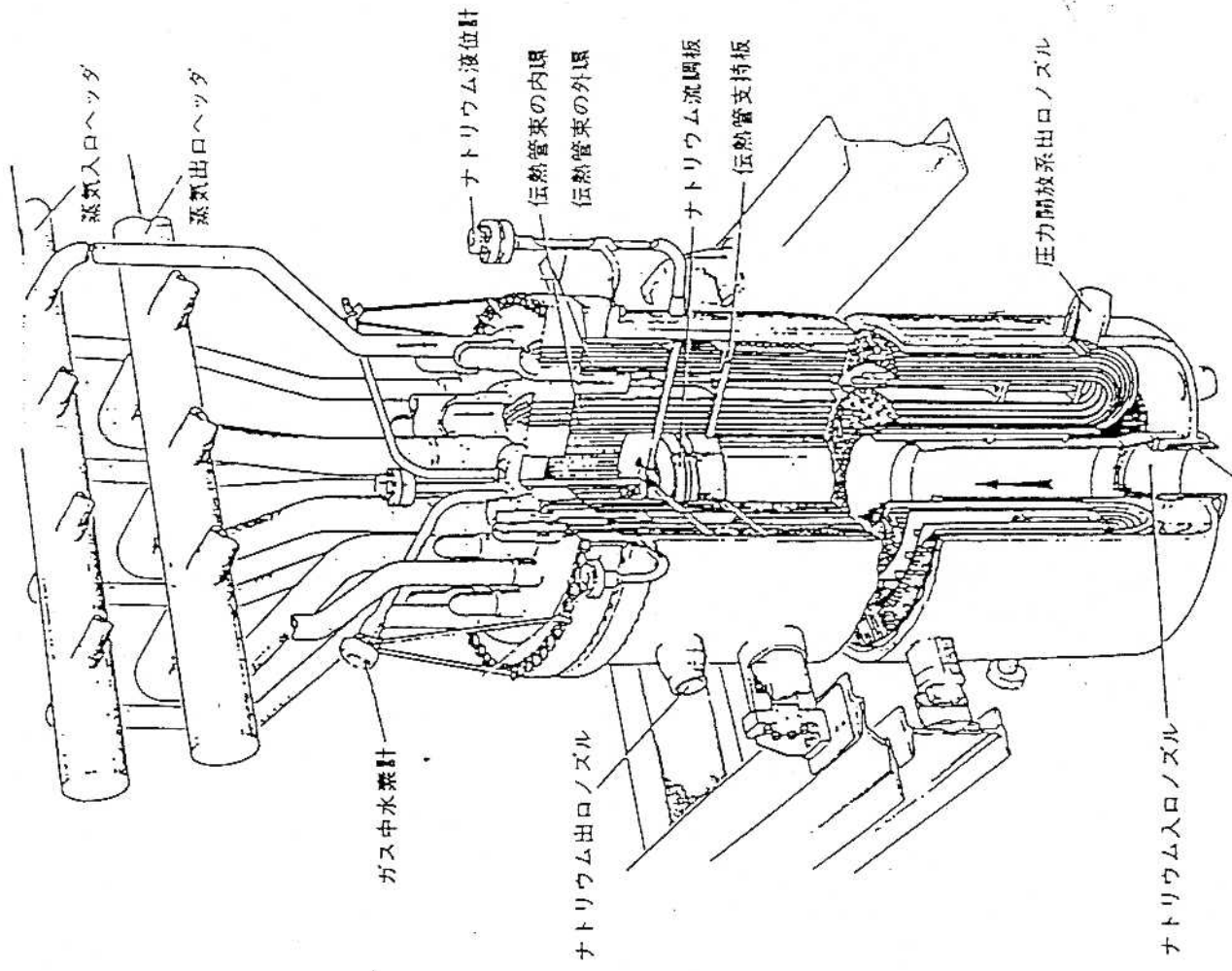


U字型 (PFR 蒸発器)



(DFR)

図2 FBRの蒸気発生器各種



(a) 過熱器

(b) 蒸発器

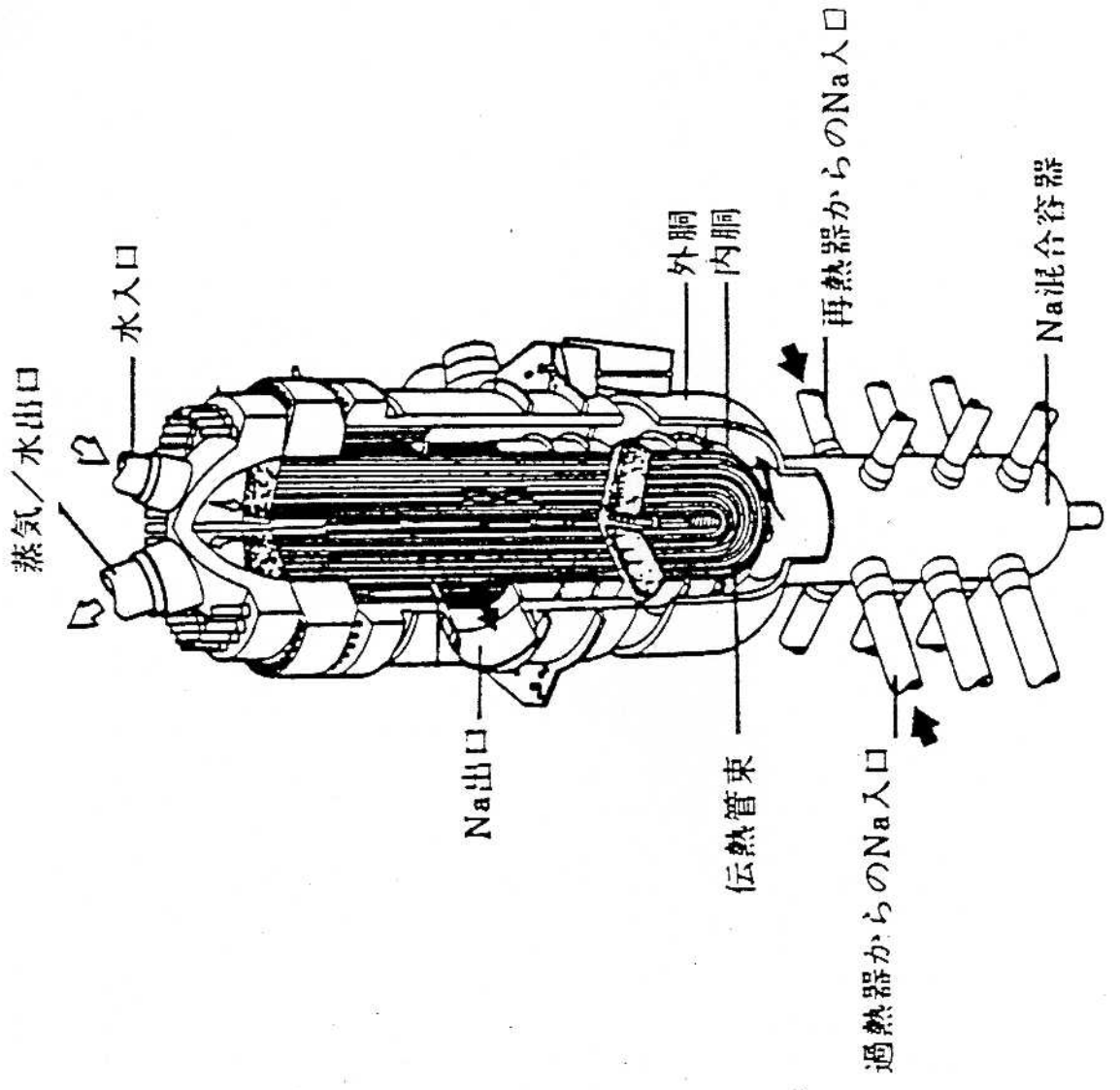
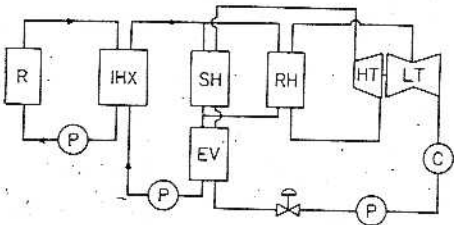


図4 PFRの蒸気発生器

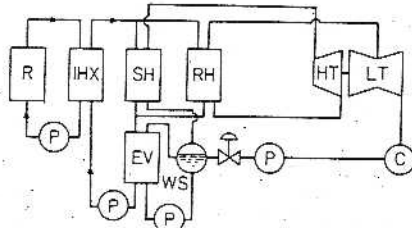
図2 表 EV, SH, RH の構成による分類 (2)

構成	特徴	採用プラント名	構成	特徴	採用プラント名
	<ul style="list-style-type: none"> <li>再熱サイクルでプラント熱効率が高い</li> <li>シュールの数が多い</li> <li>Na の混合と流量配分にやや問題</li> <li>製作上は楽</li> <li>SH, RH, EV の伝熱管材料を独立に選べる</li> </ul>	PFR Phenix BN-600 もんじゅ		<ul style="list-style-type: none"> <li>非再熱のためプラント熱効率がややおちる。タービン低圧側の蒸気湿度が大</li> <li>設計の自由度、製作上に問題</li> <li>SG コストは最も安価</li> <li>SH, EV の伝熱管を異種材料にして結合するか Na 温度を下げる必要がある</li> </ul>	Super-Phenix
		<ul style="list-style-type: none"> <li>非再熱であるためプラント熱効率がややおちる。タービン低圧側の蒸気湿度が大</li> <li>製作上は楽</li> <li>Na 流量配分と混合の問題はない</li> </ul>		SNR CRBR BN-350	蒸気発生器・過熱器および再熱器の一体形

←は Na の流れの方向を示す。



(a) 貫流型システム



(b) 再循環型システム

図3 表 SG システム構成図 (1)

R: 原子炉, SH: 過熱器, HT: 高圧タービン, WS: 汽水分離器, IHX: 中間熱交換器  
 EV: 蒸発器, LT: 低圧タービン, P: ポンプ, RH: 再熱器, C: コンデンサ

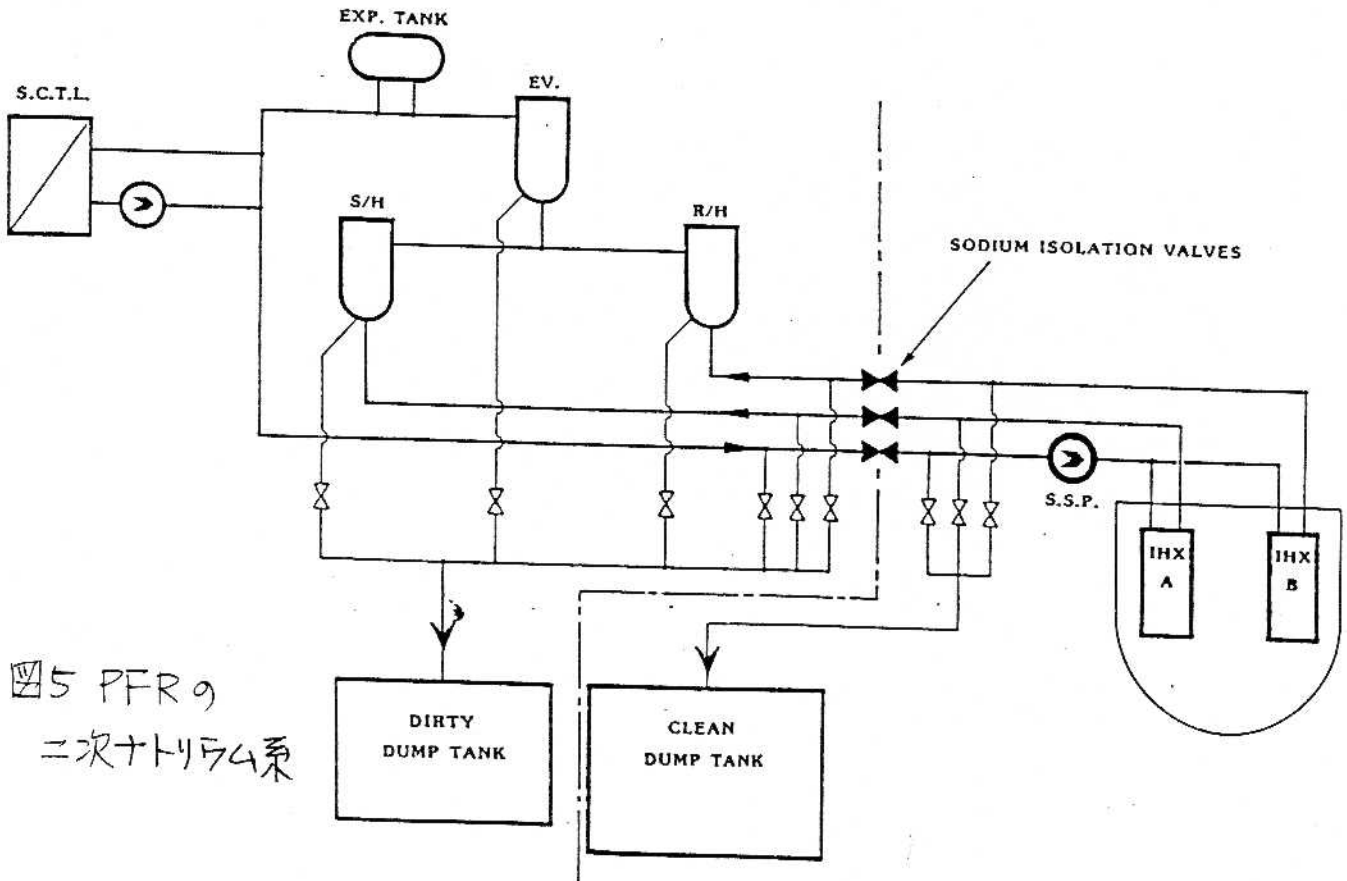


図5 PFRの  
二次ナトリウム系

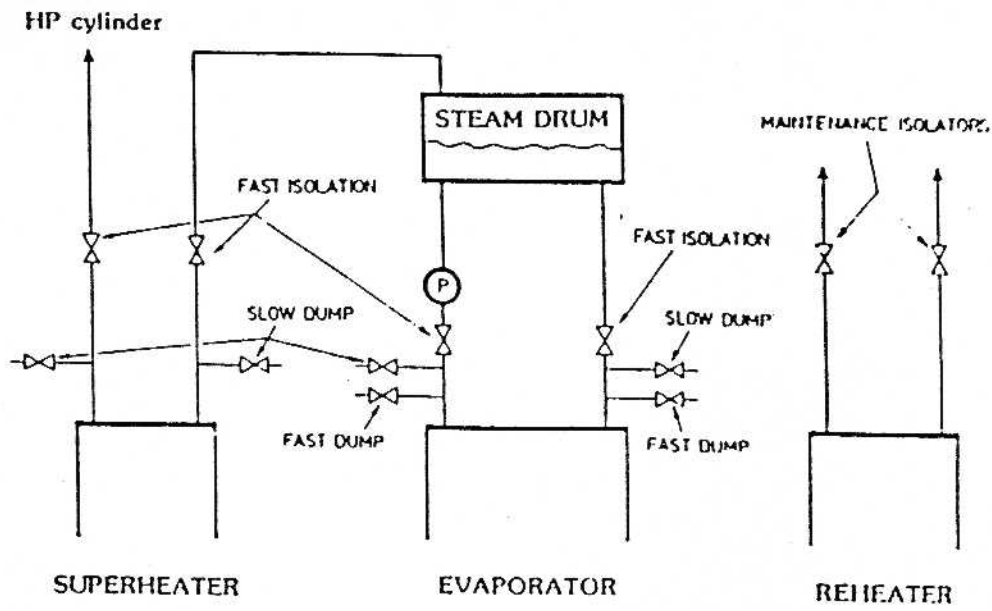
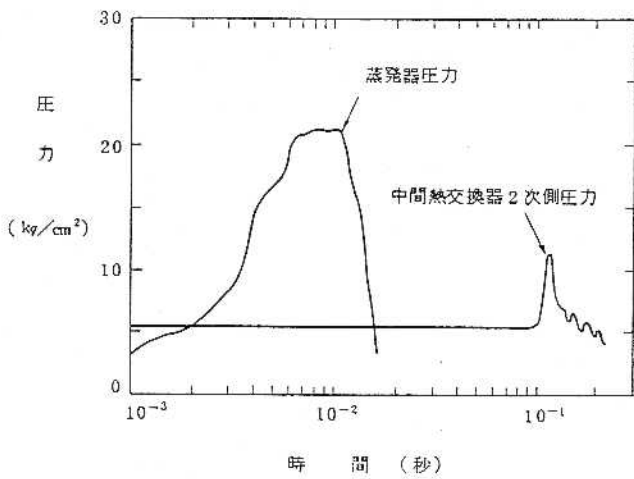
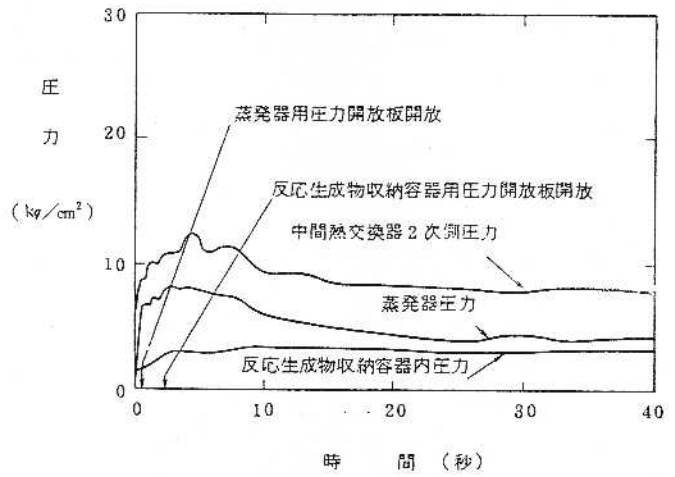


図6. Na-水反応時の水/蒸気系防護バルブ



(1) 初期スパイク圧力



(2) 準定常圧力

図7. DBA時の蒸発器およびIHXでの圧力挙動 (「もんじゅ」の場合、設置申請書あり)

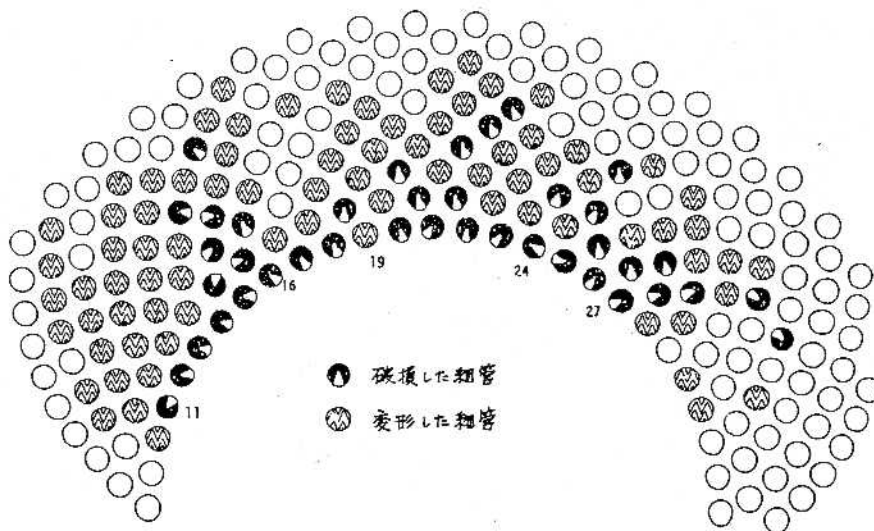
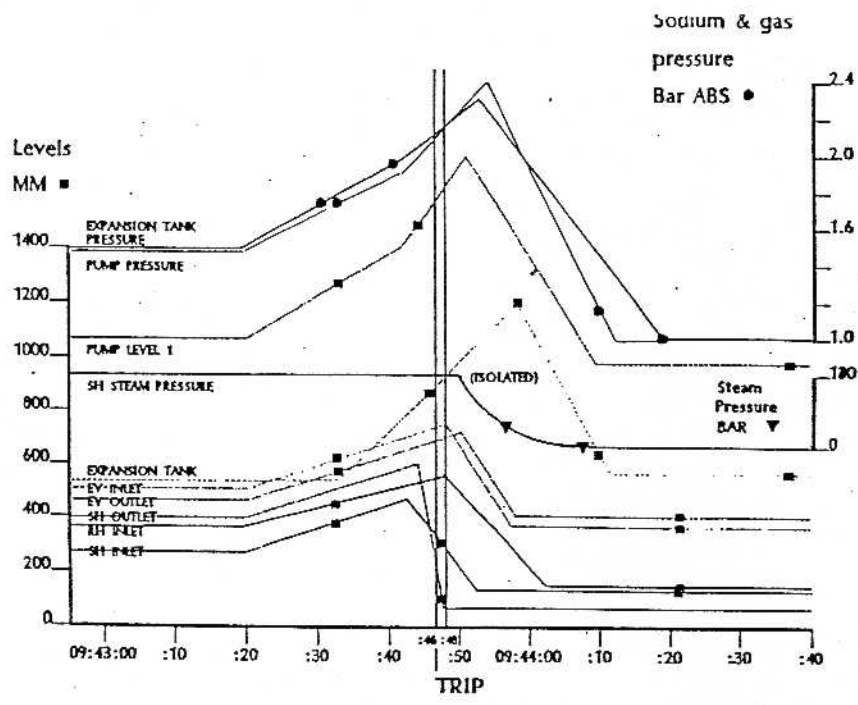
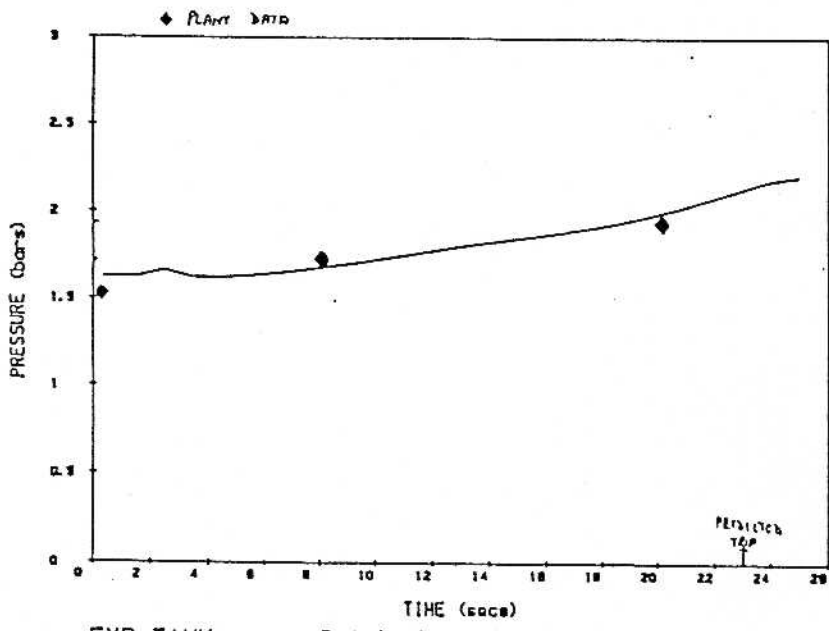


図8 英国の高速増殖原型炉(PFR)の蒸気発生器破損事故



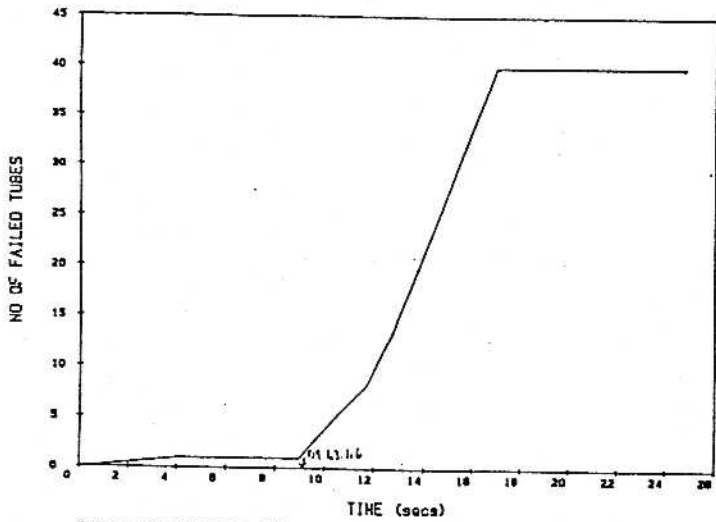
9 705-ト-テ-9



EXP TANK - 0-1 kg/s over 20 secs

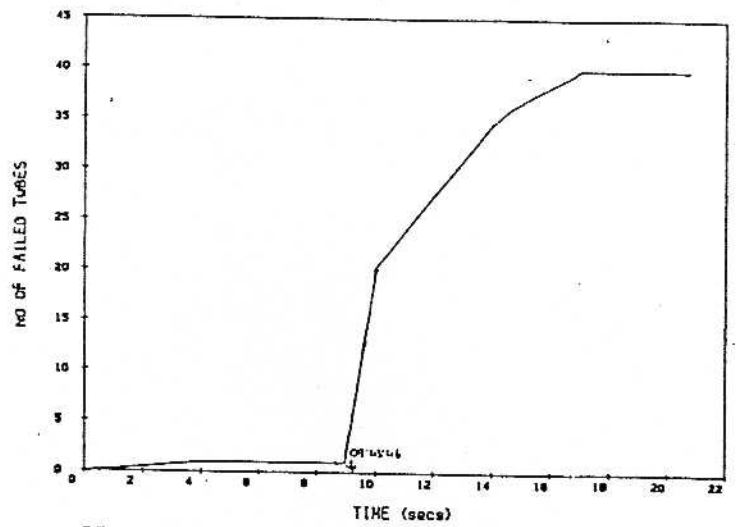
10

11 (a)

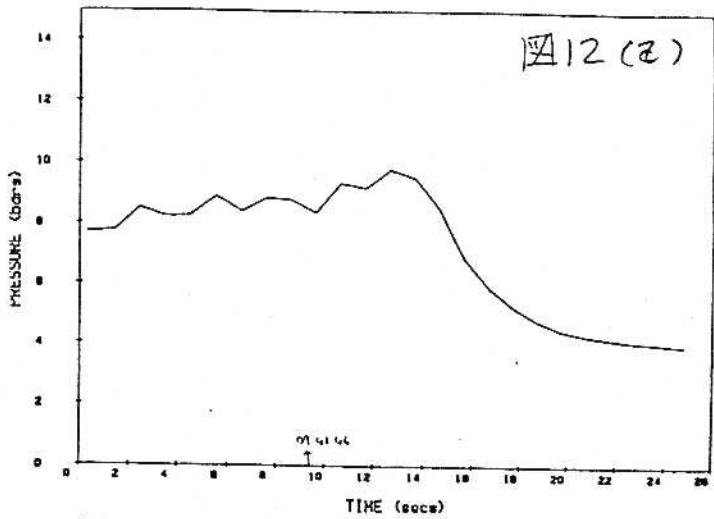


BEST ESTIMATE FINAL ESCALATION

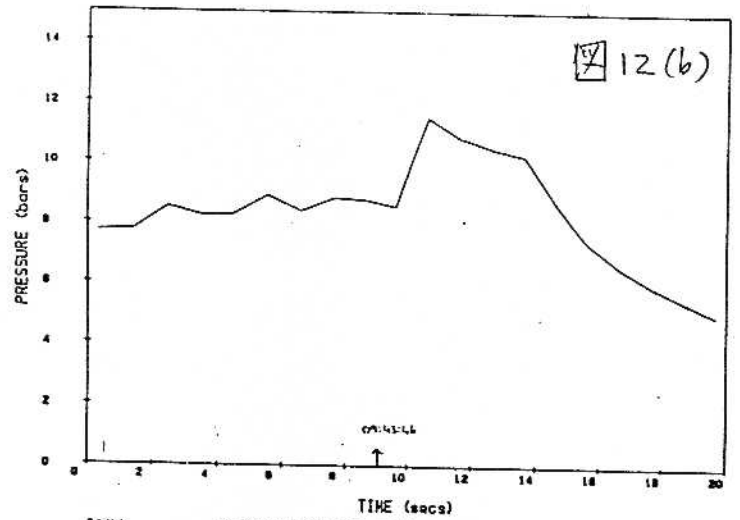
11 (b)



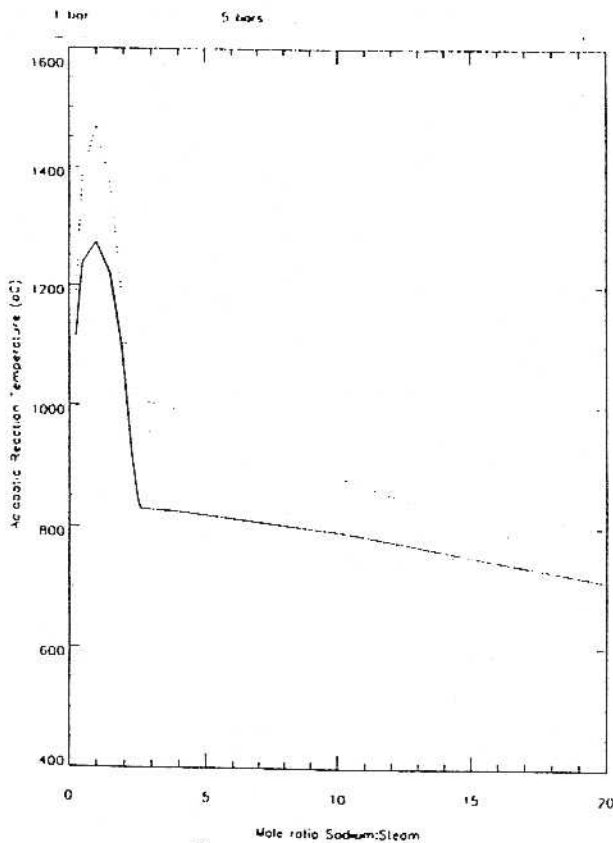
PESSIMISTIC FINAL ESCALATION



IHX - BEST ESTIMATE FINAL ESCALATION



IHX - PESSIMISTIC FINAL ESCALATION



13

14

CATEGORY 1	CATEGORY 2	CATEGORY 3	CATEGORY 4	
RUPTURE	DUCTILE	DUCTILE	BRITTLE	
THIN LIP	THIN LIP	THICK LIP	THICK LIP	
Transgranular failure high ductility	Mixed IG and IG high ductility	Mixed IG and IG high ductility	Very low or zero ductility Pure IG failure	
Favoured by high stress and low temperature eg 120 bar 1250°C	Intermediate Pressures and T <sup>0</sup> s		Favoured at low stress and high T <sup>0</sup> eg 40 bar 1350°C	
<u>Tubes</u>	<u>Tubes</u>	<u>Tubes</u>	<u>Tubes</u>	
17	11	12	66	
18	13	14	215	
22	15	20	216	
23	(16 is a special)	21	325	
70	24	67	(26)	
	25	72	border-line	
	27	73		
	123	77		
	127	78		
	221	118	(231)	
		119	border-line	
		128		
		130		
		131		
		170		
		228		
		176		
5 off	9 off + Tube 16	17 off	2 off	4 off
				Total 38 + 2 tubes to Europe

1987年2月に発生したPFR NO.2過熱器におけるナトリウム中漏洩  
( 訳文 )

( 原題 The under sodium leak in the PFR Superheater 2 in February 1987 )

R. カリー、 G. A. B. リネカー、 D. M. エッジ  
(R. Currie) (G.A.B. Linekar) (D.M. Edge)

( IAEA IWGFR 蒸気発生器破損伝播にかんする専門家会議 1990年  
9月26-28日 )

要 約

1987年2月、英国 ドンレイにある高速原型炉(PFR)のNO.2過熱器において、ナトリウム中への水漏洩事故が発生した。この事故で、両端ギロチン破断(DEGF)に相当する細管の破断が、全部で40本の細管に起こった。そのうち39本は、約10秒内に起こった二次破断であった。

この報告書では、漏洩中のプラントの挙動、および自動的な防護装置・収束装置の応答について述べる。細管束に観測された破損状況の詳細についても述べる。

漏洩進展経過の推定と、最も厳しいシナリオを想定した場合に中間熱交換器(IHX)がうける圧力負荷を推定する。この圧力負荷は、安全評価の事故解析に用いられた設計基準事故(DBA)の予想結果と比較された。その結果、本過熱器の多重細管破断事故中にIHXにかかった圧力は、DBAでの予想値を超えなかった。ただし、DBAでは蒸発器の細管が1本破断するとしたものである。

漏洩が進展するメカニズムも、裏づけ実験のデータによって説明する。実験によると、この事故では、最初の1本の漏れを除くと、細管は過熱によって破断したと解釈することが出来、腐食やウエステージは重要でなかったと思われる。

細管束を冶金学的にみると、最初の1本と、フレッチングを起こしていた細管おそらく1、2本を除くと、細管の破断は、管内の冷却が停止されるトリップの働いた後に破断したことを示している。また、細管内圧のまだ高いトリップ初期に破断した細管は比較的低温で破断し、後になって破断した細管では、管内の圧力が著しく低下していたことを示している。破断した細管以外にも多くの細管が、800°C以上の高温に晒されていた。しかし、それらは事故の後期、すでに細管内の圧力が抜けていた頃に加熱されたため、破断には到らなかった。

また、初期のナトリウム-水反応実験でなぜ今回のような事態を予想させるデータが得られなかったのか、なぜ”ピストン排除効果”が過熱による細管の多重破断を防止できなかったのか、についても言及する。

この事故がPFR二次系の安全評価用事故解析におよぼす影響と、安全評価の見直しに必要な技術上の改造やR&Dについては、本会議の他の報告において述べる。