1 解説

液体金属冷却高速増殖炉用蒸気発生器の現状

(動力炉・核燃料開発事業団) 鈴木庸一, 中井 靖, 星 有一, 斎藤 毅

液体金属冷却高速増殖炉用蒸気発生器は Na 冷却高速炉発電プラントでは重要な機器とされ、世界各国ともその開発には特に重点がおかれている。この Na 加熱蒸気発生器のプラントでの位置づけ、型式と構造別にみた実用例、設計上の留意点、研究開発項目とその内容、Na-水反応を中心にしたこの蒸気発生器の安全性について最近の世界の状況を記す。

I. ま え が き

液体金属冷却高速増殖炉(以下 LMFBR と略称する)では、原子炉で発生した熱を 1 次冷却系で取り出し、中間熱交換器を介して放射化されない 2 次冷却系に伝え、さらに LMFBR 用蒸気発生器(以下 SG と略称する)を介して過熱蒸気を発生させてタービンを駆動する。この 1 次冷却系と 2 次冷却系の冷却材は Na でその炉心出口温度は $500^{\circ}\sim 550^{\circ}\text{C}$ 、SG 入口温度は 500°C 程度が多い。したがって LMFBR 用タービンの蒸気条件は $480^{\circ}\sim 520^{\circ}\text{C}$ 、 $100\sim 170\text{ kg/cm}^2\text{ g}$ 程度が普通である。第 1 図はわが国の高速増殖原型炉「もんじゅ」の基本系統図で SG の位置づけの 1 例を示す。

SG は火力プラントのボイラに相当するもので本質的には従来の熱交換器とあまり変らない。しかし熱源が Na であること、漏れが生じた場合に Na-水反応を起すこと、LMFBR プラントの系統からくるいろいろの要求などの特異点があり、発電用 LMFBR の主要機器のうちでも「Key Component」といわれ、各国ともその開発にはとくに大きな力をいれている。

Na 加熱蒸気発生器の歴史は古く、海外ではすでに約 25 年の経験を持ち、いろいろと模索が行われたが、最近の発電プラント用に採用されている SG を型式、構成、伝熱管の形状について整理し、その概要を次に記す。

(1) 型式: 現在世界的にみた場合、SG を構成する蒸気発生器、過熱器、再熱器(以下それぞれ EV, SH, RH と略称する)をひとつのシェルにいれるユニット型と適当な容量で開発されたモジュール機器を複数基配列するモジュール型とがある。ユニット型ではプラント容量が大きくなるにつれて、1 ユニットの容量は増加し、将来は加圧水型軽水炉なみの 300 MWe/ループ 程度が容量的な目標となろう。ユニット型は経済性

をねらっており、一方モジュール型は $50\sim 100\text{ MWt}$ のモジュールを 2~5 基配列するもので経済性は劣るが、SG 故障時のプラントの稼働率をあまり下げないですむ点が有利である。LMFBR の原型炉の実用例についていえば「もんじゅ」、イギリスの PFR はユニット型を、西ドイツの SNR-300、アメリカの CRBR、フランスの Phénix はモジュール型を採用している。

(2) EV, SH, RH の構成: EV, SH, RH を構成別にみた分類結果を第 1 表に示す。

(3) 伝熱管形状: 伝熱管の形状は直管、U 字管、ヘリカル、コイル管など数種類が実用されており、その分類結果を第 2 表に示す。これらの分類を詳細にみると SG は世界的に各種のものが開発されつつあるといえる。実際に各国の LMFBR で採用されている SG の EV, SH, RH についての仕様を第 3 表に示す。またこれら SG の構造を第 2 図に示す。

SG の開発試験あるいは LMFBR での運転実績について見るとわが国では 50 MWt 容量の 1 号機 (EV と SH で構成されている) の試験が完了し、1975 年の秋から 2 号機の試験にうつることになっている。これらはいずれもヘリカル・コイルの伝熱管をもったユニット型で貫流方式のものである。同様に SNR-300 用 50 MWt 容量の直管形とヘリカル・コイル形 SG の試験と CRBR 用 35 MWt 容量のホッケー・スティック形 SG の試験も終了している。またソビエトの原型炉 BN-350, PFR, Phénix 用 SG はすでに LMFBR プラントに組み込まれて運転が行われており、大型の SG の試験経験が積みあがっている。

これら SG の関連研究としては世界的に伝熱管漏洩

Present Status of Steam Generators for Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactors in the World, Yoichi SUZUKI, Yasushi NAKAI, Yuichi HOSHI, Tsuyoshi SAITO.

第 1 図 「もんじゅ」主系統概要図

第 1 表 EV, SH, RH の構成による分類

構 成	特 徴	採用プラント名	構 成	特 徴	採用プラント名
蒸気発生器・過熱器・再熱器分離形 	<ul style="list-style-type: none"> ・再熱サイクルでプラント熱効率が低い ・シェルの数がふえる ・Na の混合と流量配分にやや問題 ・製作上は楽 ・SH, RH, EV の伝熱管材料を独立に選べる 	PFR Phenix BN-600 もんじゅ	蒸気発生器・過熱器および再熱器の一体形 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・設計の自由度、製作上に問題 ・SG コストは最も安価 ・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 	Super- Phenix
	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・製作上は楽 ・Na 流量配分と混合の問題はない 	SNR CRBR BN-350			

←は Na の流れの方向を示す。

第2表 SG の伝熱管形状による分類

	特 徴	
	主な利点	欠 点
直 管 形 (含ホック ー・ステ ィック)	<ul style="list-style-type: none"> ・製造が簡単 ・リーク管の修理が比較的容易 ・供用期間中検査のセンサの挿入が楽 ・不安定現象は少ないし、無液面なので液面制御は不要となる 	<ul style="list-style-type: none"> ・管・胴体ともに熱膨張の逃げがやや苦しい ・並行流形なので熱交換性が劣る ・管を溶接しない場合には管が細くなり本数をふやす必要がある。したがって管と管板の溶接箇所がふえ、Na-水反応時のウェステージ上不利 ・Na 管板が Na 中にあるので管板の熱衝撃が大 ・無液面のためNa-水反応時の圧力が大
U 字 管 形 (ヘアピン 形を含む)	<ul style="list-style-type: none"> ・リーク管の修理が比較的容易 ・形状が直管より短くできる ・配列によっては大形ユニット形にもなる ・管の熱膨張の逃げが楽 	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量になると大型化する ・下降管の沸騰特性と動特性に難 ・並行流のため熱交換が劣る
ヘリカル・ コイル形	<ul style="list-style-type: none"> ・良好な直交流熱伝達特性が利用できる ・形状は多分最も小型化が可能 ・管長を大きくとれるので管と管板の溶接部の数が少ない ・管径を大きくできる ・管板をガス中に出せるので管板熱衝撃が少なくなる ・有液面の時にはNa-水反応時の圧力が小。また破壊板をガス中におけるので信頼性が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・管の組立てが困難 ・供用期間検査のセンサの挿入が困難 ・管の支持、耐振動構造が複雑となる ・ダウンカマを持つものは不安定現象が生じ易い ・管の引き抜きが難しい
バイヨネット 形	<ul style="list-style-type: none"> ・U字管形の変形で熱衝撃対策が楽 ・低出力時の安定性がよい 	<ul style="list-style-type: none"> ・給水管と蒸発管の間に熱遮蔽が必要 ・管板が2層、大型になる

第2図 世界のSGの構造図

て記す。

II. SG 設計上の留意点

1. 概 要

SG の設計上の留意点は種々あるが必ずしも全部が SG 特有のものとは限らず、過去経験の多い軽水炉または火力プラントにおいても問題となっている事項が多い。しかし例えば火力ボイラにおいては構造設計の欠陥による機器の破壊が必ずしも原子力におけるほどの大きなトラブルとならないこと、後述のように伝熱特性上金属抵抗や管内面の汚れが SG ほど重要でないこと、SG では軽水炉では経験しないほどの大きな熱衝撃が生じるなど従来注目されなかった点について新しく出て来た事項が多い。しかし一方では現在まで運転されて来た SG の故障例の大半は溶接部の欠陥に起

時の Na-水反応にとくに大きな力が注がれ、小リーク($10^{-1} \sim 10^2$ g/sec 程度)から大リーク(10^3 g/sec 程度)までの各種の試験が行われ、開発の初期には問題とされた SG の水漏れも SG 本体、放出系、リーク検出系の設計、製作、運転法を適当にすれば実際のプラントの健全性と安全性は問題にならない程度にまで解決されている。

次に最近の SG に関する国際会議やその他で公表された文献から SG 設計上の留意点、研究開発項目とその内容、Na-水反応を中心とした SG の安全性につい

第 3 表 世界の SG の仕様一覧表

(1) 蒸気発生器

	BN-350 (ソビエト)	PFR ^(a) (イギリス)	SNR-300 ^(b) (西ドイツ)		Phenix (フランス)	Super- Phenix ^(c) (フランス)	CRBR ^(b) (アメリカ)	もんじゅ ^(d) (日本)
形 式	バイオネット 形	U字管形並 行流	直管形	ヘリカル ・コイル形	モジュラー、 ヘアピン形	ヘリカル・ コイル形	ホッケー・ スティック	ヘリカル・ コイル形
熱 出 力(MW/基)	—	104	55.4	—	9.9	750	118	163.4
基数(基/1ループ) ×ループ数	2×6	1×3	2×3	1×3	12×3	1×3	2×3	1×3
胴 材 質	—	—	—	—	—	SUS 304 TP	2¼Cr-1Mo	2¼Cr-1Mo
" 外 径 (mm)	—	—	950	1,400	—	2,900	1,320.8 ⁽⁵²⁾ (in)	2,760
伝熱管材質	2¼Cr-1Mo	2¼Cr- 1Mo-Nb	2¼Cr-1Mo-Nb	2¼Cr- 1Mo-Nb	—	インコ ロイ-800	2¼Cr-1Mo	2¼Cr-1Mo
" 外径×厚み(mm)	32×2	25×2	17.2×2.0	26.9×2.9	28×4	25×2.6	15.9×2.8	25.4×3.2
" 本数 (本)	816	498	211	77	7	357	757	280
" 層数 (層)	—	—	—	—	—	—	—	16
" 全長 (m)	—	—	—	—	—	約87	—	—
本体全長 (m)	—	—	—	—	—	22	19.8	14.6
" 重量 (t)	—	—	—	—	—	150	82	—
Na 流 量(kg/hr)	3.26×10 ⁵	3.504×10 ⁶	1.305×10 ⁶	—	2.65×10 ⁶	1.176×10 ⁷	2.883×10 ⁶	3.53×10 ⁶
給 水 流 量(kg/hr)	—	1.498×10 ⁶	1.46 ×10 ⁵	—	2.51×10 ⁵	1.22 ×10 ⁶	5.04 ×10 ⁵	3.26×10 ⁵
Na 入口温度 (°C)	420	455	454	—	475	525	458	450
" 出口温度 (°C)	265	370	355	—	350	345	344	320
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	371
" 出口圧力 (kg/cm ²)	—	174	179.5	—	172.6	182	102 (1,450psig)	150
伝熱面積 (m ² /基)	820	—	220.8	263.8	26.7	1920	—	1340

(2) 過 熱 器

熱 出 力(MW/基)	—	68	30.1	—	3.36	—	90	41.4
基数(基/1ループ) ×ループ数	1×6	1×3	1×3	—	12×3	—	1×3	1×3
胴 材 質	—	—	—	—	—	—	2¼Cr-1Mo	SUS 304
" 外 径 (mm)	—	—	950	1,400	オーステナ イト鋼	—	1,320.8	2,260
伝熱管材質	2Cr-Mo	SUS 316H	10Cr Mo Ni Nb9.10	—	—	—	2¼Cr-1Mo	オーステナ イト鋼
" 外径×厚み(mm)	16×2	16×2	17.9×2.9	26.9×4.5	31.8×3.6	—	15.9×2.8	25.4×3.2
" 本数 (本)	805	809	211	77	7	—	757	231
" 層数 (層)	—	—	—	—	—	—	—	14
" 全長 (m)	—	—	—	—	—	—	—	—
本体全長 (m)	—	—	—	—	—	—	19.8	—
" 重量 (t)	—	—	—	—	—	—	82	—
Na 流 量(kg/hr)	—	2.46×10 ⁶	1.305×10 ⁶	—	1.46×10 ⁶	—	5.769×10 ⁶	1.96×10 ⁶
蒸 気 流 量(kg/hr)	2.76×10 ⁵	3.0 ×10 ⁵	1.384×10 ⁵	—	2.51×10 ⁵	—	5.04 ×10 ⁵	3.26×10 ⁵
Na 入口温度 (°C)	450	532	520	—	550	—	502	510
" 出口温度 (°C)	420	455	455	—	475	—	458	450
蒸気入口温度 (°C)	—	353	357	—	375	—	327	368
" 出口温度 (°C)	435	514	500	—	512	—	485	487
" 出口圧力(kg/cm ²)	50	169 (2,400psia)	164.6	—	166	—	—	133
伝熱面積 (m ² /基)	455	—	167.0	199.9	14.5	—	—	480

(3) 再 熱 器

熱 出 力(MW/基)	—	28	—	—	2.39	—	—	33.2
基数(基/1ループ) ×ループ数	—	1×3	—	—	12×3	—	—	1×3
胴 材 質	—	—	—	—	—	—	—	SUS 304
" 外 径 (mm)	—	—	—	—	—	—	—	2760
伝熱管材質	—	SUS 316H	—	—	オーステナ イト鋼	—	—	オーステナ イト鋼
" 外径×厚み(mm)	—	21×1	—	—	42.4×2	—	—	45.0×2.3
" 本数 (本)	—	—	—	—	7	—	—	169
" 層数 (層)	—	—	—	—	—	—	—	13
Na 流 量(kg/hr)	—	1.044×10 ⁶	—	—	1.03×10 ⁶	—	—	1.57×10 ⁶
蒸 気 流 量(kg/hr)	—	2.05 ×10 ⁵	—	—	2.23×10 ⁵	—	—	2.92×10 ⁵
Na 入口温度 (°C)	—	532	—	—	550	—	—	510
" 出口温度 (°C)	—	455	—	—	475	—	—	450
給水/蒸気 入口温度 (°C)	—	305	—	—	308	—	—	312
蒸気出口温度 (°C)	—	516	—	—	512	—	—	485
" 出口圧力 (kg/cm ²)	—	32.5 (462psia)	—	—	34.4	—	—	33.2
伝熱面積 (m ² /基)	—	—	—	—	18.5	—	—	640

注: (a) Na 再熱, (b) 非再熱, (c) 蒸気発生器・過熱器の一体型, 非再熱, (d) 3種類の設計をしており, そのうちの1例を示す

因しており、溶接設計はさらに健全性を向上させるための努力がなされると思われる。

2. 構造上の留意点

従来取り上げられているのは主として、伝熱管内面供用期間中検査、水側ドレンの難易、管板取付位置(Na 中におくか、カバーガス中におくか)、管束引抜きの可能性、伝熱管形状等に関するものである。第2表より明らかなように伝熱管形状についてはそれぞれ利害得失がある。ここでは主として伝熱管形状と Na の自由液面の有無に重点を置いて記す。伝熱管形状としては一般にヘリカル・コイル形と直管形に分類される。直管形は主としてヨーロッパとくにフランスと西ドイツのいわゆるモジュール形式として発達したものである。アメリカの CRBR 用の AI 社ホッケー・スティック形も直管形に分類される。一方わが国で開発されてきたヘリカル・コイル形は小形化という意味で将来炉における有利性があるが、製作、組立上は比較的高度の技術を必要とする。しかし動燃事業団の 1 MW, 50 MWSG の運転実績、また西ドイツ、フランスにおける同型式の試験結果から最近世界的に直管形と同等以上に評価されつつある。事実 SNR-300 には 3 ループのうち 1 ループはヘリカル・コイル形が採用される予定であるし、フランスの商用 LMFBR Super-Phenix (1,200 MWe) 用の SG としてヘリカル・コイル(ユニット形貫流方式)の採用が予定され、すでに 50 MW 級の試験が行われている。ただしヘリカル・コイル形の場合においても、わが国のように水側管板をカバーガス空間に置き下降管部を設け自由液面を持つものと、給水管を各管ごとに下部鏡板または胴を貫通させた SNR-300(無液面型)や Super-Phenix(有液面型)型式など種々設計されている。後者の型式は伝熱管の配列、組立、流動不安定性の面から有利であるが、管板が Na 中に入り、また管束引抜き不可能という欠点もある。いずれの型式においても伝熱管の内面からの供用期間中検査がかなり困難であり、現在各国共その検査技術の開発に取り組んでいる。わが国においても主として渦電流探傷方式のセンサの開発および挿入性の試験が実施されている。

3. 材料上の留意点

現在稼動中または計画中の SG はほとんどが胴側に Na を流し、管側に水を流している。したがって、伝熱管は高温、内部が高圧で、腐食や Na 側での脱浸炭などの影響を受けることになり、その材料には特に大きな関心が払われている。

(1) 溶接性、強度

EV 伝熱管の溶接性に対する一般的な評価では Cr-Mo 鋼に比べて、安定化 Cr-Mo 鋼は溶接時における予熱温度、溶接後における熱処理温度を多少高める必要性があることおよび衝撃値が一般に低い等の問題はあるが逆にクリープ破断強度、脱炭等の面で優位であるといわれている。一般に、ヨーロッパでは Nb 安定化 Cr-Mo 鋼が用いられ、アメリカはいわゆる Cr-Mo 鋼を用いている。わが国でも $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼を用いている。Cr-Mo 鋼以外の材料としてはインコネル-600、インコロイ-800などが考えられているが、これら間における優位性について定量的に発表されたデータは比較的少ない。

(2) 応力腐食に対する抵抗性

一般に 2 種類に分けられ水中の Cl^- 、溶存酸素、応力、温度に関連したいわゆる chloride 応力腐食と、応力、温度は同様であるが NaOH 等のアルカリ液によるアルカリ腐食がある。前者は主として SUS において顕著である。またインコネル-600、インコロイ-800 にあってはこの種の腐食によるワレは極めてまれである。またアルカリ腐食は SUS に限らず炭素鋼においても最近多くの例を見るようになった。SG における腐食例では小リーク、洗浄時等における残存低濃度アルカリの伝熱管表面またはクレビス部における濃縮が原因となっているものがある。両者に対する各種実験と試験が行われているが、実験室規模での腐食条件がどこまで実機に適用できるか検討されている。

(3) 脱炭、浸炭

脱炭とは鋼表面より炭素が Na 中に移行し、強度劣化が起こる現象である。SG 用機器、配管は SUS が多く用いられているため炭素含有量の高い EV 用 Cr-Mo 鋼に脱炭が起こる。同じ SUS のみの系においては高温部に脱炭、低温部に浸炭が生じることが考えられるが、脱炭量については現在の SG 条件下ではそれほど問題ではなく、むしろ SUS 機器への浸炭が脆性の面から検討されている。この脱浸炭現象はループ構成材料、温度、Na 保有量、ループ内高低温部の表面積、純化系等が複雑にからみ合うので実機に適用できる精度の高いデータを整理中である。

4. 伝熱流動上の留意点

主として問題となっているのは必要伝熱面積の決定と熱流力的不安定現象である。従来火力ボイラにおける伝熱面積の決定に際しては、ガス側の熱伝達係数が非常に小さく伝熱管の金属抵抗は、ほとんど問題とならなかった。しかし SG においては Na 側の熱伝達係数が大きく、条件にもよるが、EV においては伝熱管

金属抵抗が総括熱伝達係数の30~40%にも達する。この熱抵抗は管の肉厚、径、熱伝導率等によって決定されるので、肉厚公差、径公差に対する製造上の管理と同時に設計時には特にEVで多く使われるCr-Mo鋼に対する熱伝導率を妥当な値に選ぶことが必要である。熱伝達係数については水側は従来火力ボイラ等で使用しているものとほぼ同じである。Na側は一般にHoeの式、Graeber-Riegerの式、その他の液体金属による実験式が用いられている。またSGにおいては水側の汚れ係数が重要な意味をもってくる。火力ボイラの場合SGほどの影響がないことはもちろんであるが、定検時等において伝熱管の一部を切断し、内面検査を行い、ある程度以上の汚れに対しては洗浄を行うことを原則としているため設計時点での値を決定しやすい。SGにおいては信頼性の上からNa中の溶接をできるだけ減らすということもあってこのようなサンプリング方式はとりにくいからである。最近、低流量時におけるSGの性能については、シエル内流量の不均一性および伝熱式自体の適用性などの面から再検討されている。SNR-300またはCRBRのように崩壊熱除去を1次冷却系からタービン系までの主冷却系にたよっている場合においては、実験による低流量時の性能確認のための伝熱研究が実施されている。補修については例えばSNR-300やSuper-PhenixのSGにおいては管束の引抜きが不可能であるし、わが国のSGのように管束の引抜きは可能であっても、引抜き作業にはかなりの慎重さを必要とする。したがって、今後洗浄方法に対する策(洗浄時期の決定と洗浄方法)を考慮した汚れ係数選定が設計上のひとつの留意点となるであろう。現在わが国を含めて各国ともNa側について汚れ係数をゼロとしているが、最近中間熱交換器の実験例から、Na側にも運転時間に応じて汚れ係数をとるほうがよいとの意見も出ている。SGでは場合により流れに脈動が生ずることがわが国での1MW SGをはじめとしてフェルミ炉用SG、ALCO/BLH社製SG、GE社2MW SG、WH社1MW SG等においても種々報告されている。初期においてはこれらの現象の原因はSG特有のものであると考えられていたが、最近ではNaや加圧水のように高い熱伝達率を有し、かつ一定の温度に近い流体によって加熱され、二相流沸騰を伴う熱交換器に対して起こるものであるという調査結果も出ている。不安定を論ずる場合、一般には密度波振動と並列チャンネル不安定現象という形で討議されることが多い。これらに対処するため後述の各種開発試験が行われている。

5. その他

以上のほか主として設計上考慮しておくべき留意点を次に列記する。

- (1) 沸騰点の変動による伝熱管の疲れ解析。
- (2) 液面のある型式の場合の液面変動解析。
- (3) Na-水反応時の圧力によるSGの健全性と放出系の設計。
- (4) 小リーク後における伝熱管の補修手順と方法(プラグギング)。
- (5) 水系からのSG伝熱管を通してのNa側への水素拡散による水素バックグラウンドの増加(とくに水注入初期に多い)と小リーク検出能力。

Ⅲ. 開発試験(R & D)

SGのR & Dは蒸気発生器としてのモデルによる特性試験、管と管段の溶接、材料選択など多くのものが実施されたが、最近とくに重点をおいて世界的に実施されているR & Dを次に記す。

1. 不安定現象に関するR & D

不安定現象それ自体は既述のように種々経験されているが、現在各国とも不安定現象装置または既設の施設を使用し、解析コードの妥当性を確かめている。解析コードとしては、軽水炉BWRプラントの炉心安定性判別のためにアメリカで作成されたSTABLEに膜沸騰域を追加したいわゆるDYNAM(周波数応答解析)を一部SG用に改良したものと時間領域不安定解析コード(周波数応答に対して)が各国で開発されている。西ドイツ、フランス、アメリカにおいては既にある程度の実験がなされているようである。わが国においても1MW SGの実験により修正DYNAMコードの実証がされつつある。さらに動燃事業団の大洗工科学センターで製作中の不安定現象試験装置による結果から、前述の2種類のコードに対するチェックが行われ、「もんじゅ」設計に反映されることが期待されている。

2. 脱炭素に対するR & D

多年にわたってアメリカなどで行われた結果が1949年3月ロンドンで開催された高速炉会議において発表された。この中で炭素鋼中の炭素移行が拡散支配型であることに注目し、実験により脱炭割合定数を求め、寿命中における炭素減量を推定する試みがなされている。この結果により「もんじゅ」プラントのEV伝熱管の寿命中の炭素減量を計算すると約0.02%程度となる。ASME Code Case 1331-8に与えられたCr-Mo鋼の試験データは炭素含有量が0.07%以上ということ

なので、初期0.10%以上であれば寿命中脱炭による強度劣化はないと考えられる。しかしこれはあくまで実験室データによるものであり、既述のように試験データのループ依存性を考えると妥当な値をSGの設計に適用する必要がある。また一般にヨーロッパで採用されているNb安定化Cr-Mo鋼についてはInteratomで実験が行われており、脱炭量は一般にCr-Mo鋼より少ないといわれている。

わが国においても大洗工学センターをはじめ国内各メーカの研究所でこの関係試験が多数行われている。

3. 応力腐食に関するR&D

Chloride およびアルカリ応力腐食に関する研究はアメリカにおいて体系的に実施されている。例えばCl⁻による応力腐食についてはSG材のCr-Mo鋼およびSUSの溶接部と非溶接部について、280°~480°Cの温度範囲で低サイクル変化を与えた後Cl⁻ (10 ppm), O₂ (20 ppm)の条件下で20 hr, 280°Cの飽和温度に保持し亀裂のチェックを行なっている。またアルカリ腐食についてもアメリカで集中的に行われており、濃度範囲5% NaOH溶液くらいまでのものについて付加応力、熱処理条件を考慮した試験が行われている。

4. 使用期間中検査に関するR&D

プラント稼働率を上げる意味で使用中の伝熱管検査のために、各国共伝熱管内面からの渦電流探傷法または超音波探傷法による小型の検出素子の開発に取り組んでいる。一方直管形またはイギリスのU字管型のSGではプローブの挿入が比較的容易であるが、わが国のようにヘリカル・コイル形でしかも下降管部を持つSGでは難しく、現在このため従来から開発されて来た有線式に加えて無線式の検出素子開発および挿入方式(水圧または気体圧送)が考えられている。また、これとは別にIn-placeにおける破損伝熱管の検出方法とそのブラギングの方法に対するR&Dが進められている。例えば、伝熱管破損個所の検出においては、いわゆるSelf-pluggingと呼ばれる現象があり、小リーク破損の検出を難しくしている。これはSGを停止しNaをドレンした後、運転中の破損孔がNaまたはその酸化物でふさがれてしまうものである。したがって、ドレン温度または冷却期間いかにしてその破損孔を開いた状態にしておくかという手法も種々考えられている。またブラギング方法については、以前からフェルミ炉などにおいて用いられて来た溶接キャップ方式から遠隔操作に適した爆着法の開発が考えられており、PFRでは既に実機に適用し成功している。

IV. SGの安全性(Na-水反応)

1重管を採用しているので、万一、伝熱管にき裂が生じると、高圧の水蒸気が高温、低圧のNa中に漏洩し、激しい化学反応が生ずることになる。この反応は広く知られており、各国とも、これに対し充分対処した設計を行なっている。

伝熱管には一般に、微小なピンホールや、溶接部のき裂や、応力腐食ワレなどが生ずることも全くないとはいえないので安全設計の立場からは完全破断までを考えて対処することが多い。

小リークの場合には、ジェット状の反応領域が形成され、それが場合によっては周囲の伝熱管をも損傷させるので、早期にそれを検出し保護動作をする必要がある。また大リークの場合には大量の水素ガスが短時間に発生するので、なにも対策を講じない場合には、蒸気発生器本体および2次冷却系統に大きな応力をかけることになる。そこで各国ともSGには反応生成物放出系統を備え、充分安全ように対処している。なお、原子炉の安全上、どのような場合にも1次冷却系から2次冷却系に放射能が移行することのないよう中間熱交換器を置いている。

1974年10月、IAEA主催のSGに関するStudy Group会議がベンスベルグで開かれ、そこで「Summary」が採択されているので、ここでは、その中からNa-水反応に関する事項と、SGの安全性について現状を紹介する。また、最近のNa-水反応例についても触れる。

1. 大リーク

SGの設計条件を決めることになる漏洩の規模としては、各国でいくらか考えの違いが見られていたが、前記会議で、数本の伝熱管が同時に破断することすなわち、それぞれの伝熱管が数 msecの間に破断する両端破断が討論され、その結果設計基準としては、小リークの伝播を考慮した場合でもなお初期事象として1本の両端破断を考えればよいということになった。ただしその最初の事象に引き続いて、急速な損耗(ウェステージ)または反応近傍の過熱による付随的な何本かの破断が起こり、注入される水の量および率が影響されることがあるので、これらを反応生成物放出系の設計を決定する際には考慮する必要がある。放出系の設計については、各国で既に行われている試験の結果およびBN-350の経験に基づき、満足な設計が可能であるといえる。現在のSGでは破壊板を用いており、それをSG本体近くに接近させて設置し、さらにサイク

ロン・セバレータと収納容器で Na を除去し、水素を放出するのが最も効果的である。

わが国でも、大洗工学センターに大リーク Na-水反応試験装置 (SWAT-1) を建設し、「もんじゅ」用 SG の設計条件を確立すべくデータを集積している。そこで得られている注水による初期圧力スパイクのピーク値の 1 例を第 3 図に示す。スパイク圧の幅は 1 msec くらいのものが多く測定され、内部構造を挿入した場合のピーク値は、なにも入れない場合に比べて低いことも確認されている。

第 3 図 初期スパイク圧のピーク値 (SWAT-1)

また、「もんじゅ」の 2 次冷却系を含め $1/2.5$ 規模に模擬した蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) も

建設され、1975 年 6 月には初回実験が実施された。実験は成功裡に終了したが、得られた圧力値などは計算上の予想値を下回っている。この面でもわが国は先進諸国と並んで、大型確性実験を活発に進めているといつてよいであろう。

2. 小リーク

SG の伝熱管に小リークが生ずると隣の伝熱管は損耗する可能性がある。この損耗特性は一般に損耗速度で示され、これを損耗率といっている。損耗率は第 4 図のように 1 ~ 10 g/sec のリーク率の時最大値を示す。

微小リークが突然ステップ状に増大することが最近の話題となっているが、現在までの多数本リークの経験 (ヘンゲロ、フェルミ、BN-350) から、これらの場合でも水リークの流量は単管の両端破断によるものより少なかったといわれている。しかし、大リーク反応後の SG ループの長期間にわたる停止を考えると 2 次破損の防止は経済的に大きな意味を持つので、検出可能なリークがあったならば一応 SG を停止すべきであるという意見が一般的である。現在各国で使っている検出器は、反応により Na 中に生成する水素を Ni 膜を通して拡散させる方法である。アメリカの ANL では水素計の要求性能と現状を第 4 表のように考えており大体満足するものが開発されているが、一方、水または蒸気を用い実機で校正する必要があるという意見

第 4 図 リーク率とウェステージ率のデータ集約

第4表 ANL の水素計特性

項 目	要求性能	現 状
感 度(ppb)	3	1.5
測定範囲(ppm)	0~1	0~2
応答時間(sec)	30	21~26
交換時間(hr)	1	2~3
校正時間(hr)	1	0.5~1
使用時間(yr)	10	未知

もある。

3. 最近の Na-水反応の例

(1) ヘンゲロの50 MWSG でのリーク

2回水素計が応答し系統を停止している。第1回は、1972年8月RH側水素計指示値が突然上昇し、次に通常運転時よりわずかに高い値まで落ち込み、さらに数分後アラーム点を越えるピークが発生した。RH側の温度変化や圧損を評価することにより、リーク発生点は管-管板接続部であるといわれている。第2回は1973年4月に、SH出入口、EV出口の検出計すべて、膨脹タンク内カバーガス中水素濃度が上昇した。その間、たびたび水素計の微小な変化が発生したことからループ中に留まっていた水素が拡散したものと考えられている。

(2) BN-350 SG でのリーク

1973年5月、SGに水充填数時間後、2号SGにリークがあり、45 kg/cm²まで圧力上昇した。水素検出器により12 hr以上水素濃度の上昇を観察してからSGを停止し蒸気をブローした。リーク水量は3~4 kgと評価されている。伝熱管の下部底板への溶接接目に直径約0.2~0.3 mmの孔が発見された。また1973年9月、6号SGでリークがあった。この時まで約3,000 hr運転していた。このリークはガス中水素検出器での濃度上昇信号で見つかり、数分後にガス圧が急上昇した。圧力設定値に達するまでに、運転員により原子

炉はスクラムされ、SGも蒸気ブローした。それでもガス圧は上昇し続け、2.5 kg/cm²に達してSGの保護系が作動した。水リーク量は300~500 kgと判断された。伝熱管1本と溶接接目にき裂が発見された。これらの経験から保護系の作動原理の選択が正しかったと自信を深めたようである。

Ⅶ. おわりに

SGの開発はLMFBRの分野では世界的に重点的にとりあげられ、その成果はここ1~2年の国際会議で数多く発表されている。ここではこれらの論文を中心にSGに関する特性と分類、実用例、設計、研究開発、Na-水反応を中心とした安全性について最近の状況を整理してあるが、要は世界のSGの開発がいろいろの型式について多くの経験を経ながらも着々と実用化に向かって進められていること、Na-水反応の安全性についてもその規模と特性、対策が研究され、十分に安全性の見通しがつけられつつあること、わが国もSGについては「もんじゅ」を対象にしてその開発が大々的にとりあげられ、技術開発レベルとしては世界の第一線に立っていることを強調しておきたい。

— 参 考 文 献 —

- (1) *Proc. Int. Conf. Fast Reactor Power Stations by BNES*, Mar. 11~14, 1974, London.
- (2) Reports distributed at IAEA Study Group Meeting on Steam Generators for LMFBR's, Oct. 14~17, 1974, Bensberg, Germany.
- (3) *Proc. Int. Conf. Eng. of Fast Reactors for Safe and Reliable Operations*, Oct. 9~13, 1974, Karlsruhe.
- (4) *Proc. Fast Reactor Safety Meeting by ANS*, Apr. 2~4, 1974, Beverly Hills.
- (5) J 254-72-01, 高速増殖炉蒸気発生器の安全性と開発に関する調査研究, 日本機械学会 Na-加熱蒸気発生器調査研究分科会, 1972年3月.
- (6) The European Nucl. Conf., Nucl. Energy Maturity, Apr. 21~25, 1975, Paris.