

本資料は 年 月 日付けて登録区分、
変更する。

2001. 7. 31

[技術情報室]

分置

J-225-76-1(3)
配付限定

昭和50年度動力炉・核燃料開発事業団委託調査
高速原型炉用構造材料の溶接に
関する研究開発の調査報告書

P3G (蒸気発生器)

昭和 51 年 3 月

社団法人 日本溶接協会
原子力研究委員会
P F W 小委員会

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大字村松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)

P F W P 3 G 報告書正誤表

頁	個 所	誤	正	備 考
2	図 2.1	(設計条件例：コールドレ グ設計圧力) 1 4	1 0	訂 正
4	最下行	(記入なし)	注：以下の各節で蒸気発生 器の各部素材寸法を示すが 本寸法は設計の進捗に伴い 変更することがある。	追 加 記 入
6	表 3.3	(0.2 % 耐力基準値) 1 9	1 8.5	訂 正
6	表 3.3	(クリープ強さ基準値) 5 0 0 ° C 1 3 5 5 0 ° C 8.3	} 1 9.3	訂 正
6	表 3.4	(.0.2 % 耐力基準値) 3 0 4 1 0.2 3 1 6 1 0.3 3 2 1 1 0.2	3 0 4 1 1.3 3 1 6 1 2.0 3 2 1 1 1.3	} 訂 正
6	表 3.4	(クリープ強さ基準値) 5 5 0 ° C 1 0 ⁴ HR 3 0 4 1 4.7 3 1 6 2 1.2 3 2 1 1 4.7	1 8.0 2 6.6 1 8.0	} 訂 正
8	表 3.5	(M (社) B 寸法欄) (胴板 蒸発器) - (" 過熱器) - (" 再熱器) -	8 7 0 0 8 7 0 0 8 7 0 0	} 追 加 記 入
8	表 3.5	(T (社) B 寸法欄) (胴板 蒸発器) - (" 過熱器) - (" 再熱器) -	8 8 0 0 8 8 0 0 1 0 3 0 0	} 追 加 記 入
1 4	表 4.1	(0.2 % 耐力基準値) 1 8.7	1 8.5	訂 正
1 9	表 4.6	同 上	同 上	訂 正
2 4	表 6.1	(項目：腐食および質量移 行の評価欄) 設計温度 (4 6 0 ° C)	設計温度 (4 5 5 ° C)	訂 正

1 はしがき

動力炉・核燃料開発事業団では高速増殖炉の開発を進めているが、高速実験炉に引続いて高速原型炉の建設が計画されている。

最近の高速増殖炉の開発動向は、世界各国ともに同炉の研究開発費用および建設費用の大幅なエスカレーションに腐心している。なかでも同炉の構造材料の選択は、溶接部の性能を含めて軽水炉より1グレード高い品質を保証しなければならないので、非常に重要な技術的課題である。また構造材料の性能の保証、溶接施工法の確立と、中性子およびナトリウム環境下における各種材料試験の展開は高速増殖炉の設計思想と健全性の評価に影響するところがきわめて大きいものと思われる。

日本溶接協会では高温構造安全技術研究組合の協力を得て、短期間に総力をあげて表記の課題を消化した。

本報告が有効に活用されて高速増殖炉の開発に役立てば幸いである。

ここに委員各位のご協力と動燃事業団より与えられた助言に感謝の意を表する次第である。

昭和51年3月

PFW小委員会主査

木原 博

2 調査の概要

2.1 問題

高速原型炉用構造材料の溶接に関する研究開発の調査

2.2 調査の目的

高速原型炉では高速実験炉よりさらに高温度のNa環境と高い中性子照射環境の影響を受けるので、特に溶接継手の性能低下が問題となる。本調査では、原子炉容器および炉内構造物、中間熱交換器および1次主冷却系配管、蒸気発生器、主冷却系配管用継目無管および溶材質などに関して使用材料の現状と問題点、溶接材料の現状と問題点、溶接施工法の現状と問題点、使用材料および溶接継手の環境効果を含めた高温特性の現状と問題点などについて調査を行ない、今後必要と思われる研究開発課題の取まとめを行なう。

2.3 調査範囲および内容

高速原型炉の原子炉容器および炉内構造物、中間熱交換器および1次主冷却系配管、蒸気発生器、主冷却系配管材用継目無管および溶接管の対象構造物に分けて、下記の調査を行った。

2.3.1 使用材料および溶接材料の現状と問題点の調査

使用材料および溶接材料の現状を把握するため、国内材料メーカー各社の実績を集約するとともに、外国の実状についても調査を行い、現状と問題点を明らかにした。なお対象はステンレス鋼およびクロムモリブデン鋼とした。

2.3.2 溶接施工法の現状と問題点の調査

溶接施工法の現状を把握するため、ファブリケーター各社の実績を集約するとともに、外国の実状についても調査を行い、現状と問題点を明らかにした。溶接法はサブマージアーク溶接、被覆アーク溶接、TIG溶接、MIG溶接、エレクトロンビーム溶接などを対象にした。なお材料はステンレス鋼およびクロムモリブデン鋼とした。

2.3.3 高温特性に関する現状と問題点の調査

対象材料およびその溶接継手の環境効果を含めた高温特性に関する内外のデータを集約し、問題点を明らかにした。

2.3.4 1次主冷却系配管材に溶接管を採用する場合の問題点の調査

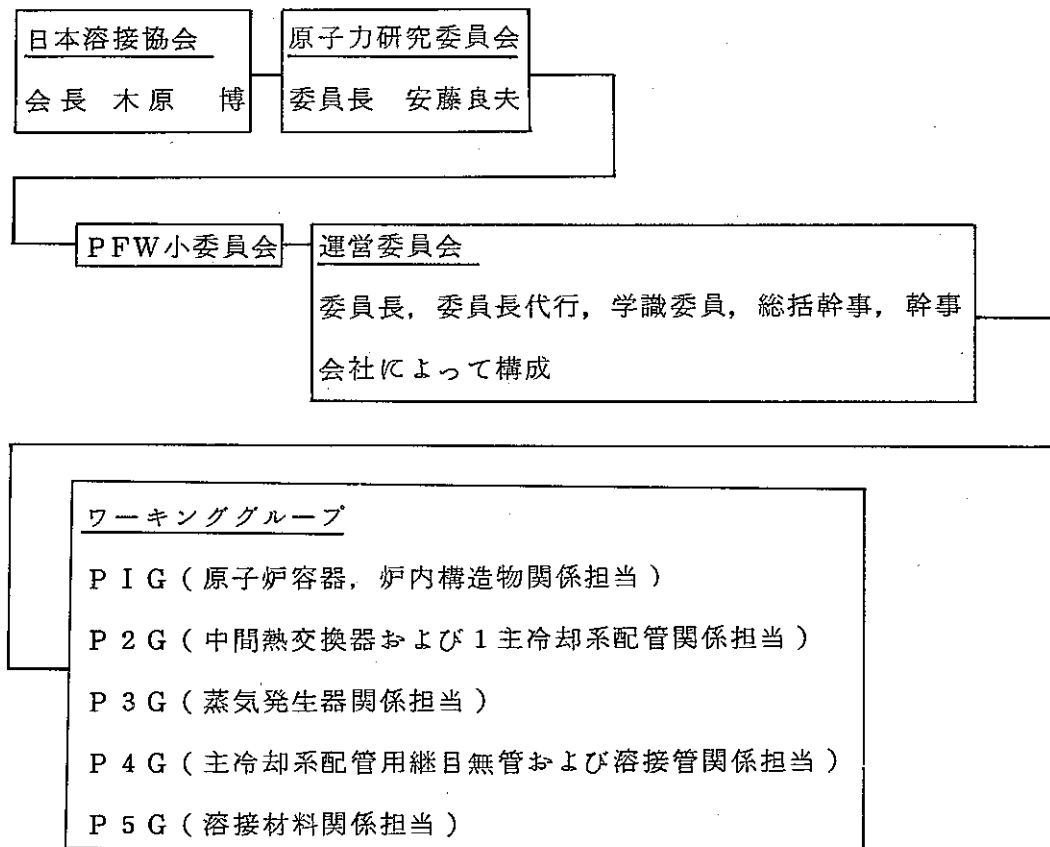
1次主冷却系配管材に溶接管を採用する場合の製造上の問題点、特に溶接継手性能、熱処理、試験および検査などについて、内外のデータを集約し問題点を明らかにした。

2.3.5 昭和51年度以降必要な研究開発課題の整理

2.3.1～2.3.4により現状の問題点を明らかにし、それに基づいて51年度以降実施する必要があると思われる研究開発課題についての提案を行った。

2.4 調査組織

本委託調査は社団法人日本溶接協会原子力研究委員会にPFW小委員会を設けて実施した。小委員会の組織は次のとおりである。



P F W 小委員会運営委員会名簿

	氏名	所属
主査	木原 博	日本溶接協会
主査代行	寺沢 一雄	高温構造安全技術研究組合
学識委員	安藤 良夫	東京大学教授 原子力工学科
〃	飯田 国広	東京大学教授 船舶工学科
〃	稲垣 道夫	金属材料技術研究所溶接研究部
〃	鷓戸口 英善	東京大学教授 機械工学科
〃	長谷川 正義	早稲田大学教授 理工学部
総括幹事	鈴木 和久	動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター・照射材料試験室
〃	藤村 理人	高温構造安全技術研究組合事務局
P 1 G 幹事	飯井 敏夫	三菱重工業(株)原子力技術部新型炉技術課
〃 副幹事	松村 誠	東京芝浦電機(株)原子力本部原子力機器製造部
P 2 G 幹事	紫藤 英造	(株)日立製作所日立工場原子力開発部
〃 副幹事	峰 久節治	日立造船(株)技術研究所堺研究室
P 3 G 幹事	羽田 幹夫	東京芝浦電気(株)原子力本部
〃 副幹事	松本 圭司	石川島播磨重工業(株)技術研究所原子力機器部
P 4 G 幹事	寺井 清	川崎重工業(株)溶接研究室
〃 副幹事	三好 滋	富士電機製造(株)原子力事業部
P 5 G 幹事	山香 誠	(株)神戸製鋼所溶接棒事業部技術本部
〃 副幹事	大岡 耕之	新日本製鉄(株)技術開発部
動燃団担当	市野 市郎	動力炉核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部
	川島 俊吉	同 高速増殖炉開発本部
	鈴木 和久	同 大洗工学センター照射材料試験室
	安部 重一	同 高速増殖炉開発本部
	岡林 邦夫	同 高速増殖炉開発本部

P F W小委員会
ワーキング作業グループ名簿

氏 名 所 属

P 1 G

幹 事	飯 井 敏 夫	三菱重工業(株)原子力技術部新型炉技術課
副 幹 事	松 村 誠	東京芝浦電気(株)原子力本部原子力機器製造部
	松 本 圭 司	石川島播磨重工業(株)技術研究所原子力機器部
	寺 井 清	川崎重工業(株)溶接研究室
	西 正	新日本製鉄(株)生産技術研究所
	安 保 秀 雄	新日本製鉄(株)生産技術研究所
	今 泉 徹	住友重機械工業(株)平塚研究所
	杉 本 威 生	同 平塚研究所第2研究室
	福 井 清	東京芝浦電気(株)重電技術研究所金属技術グループ
	白 石 隆	日本鋼管(株)技術研究所鋼材研究室
	田 辺 潤 平	(株)日本製鋼所鉄鋼技術部
	大 西 敬 三	(株)日本製鋼所室蘭製作所研究所
	深 瀬 幸 重	日本冶金工業(株)川崎製造所研究部
	坂 口 安 英	バブコック日立(株)呉工場ボイラ原子力設計部
	佐々木 正 祥	(株)日立製作所日立工場原子力開発部
	三 好 滋	富士電機製造(株)原子力事業部技術部品質保証課

P 2 G

幹 事	柴 藤 英 造	(株)日立製作所日立工場原子力開発部
副 幹 事	峰 久 節 治	日立造船(株)技術研究所堺研究室
	富 岡 靖 博	石川島播磨重工業(株)豊洲総合事務所新型炉部
	寺 井 清	川崎重工業(株)溶接研究室
	平 池 恂	川崎重工業(株)原子力部
	山 香 誠	(株)神戸製鋼所溶接棒事業部技術本部技術部
	浜 中 孝 通	同 溶接棒事業部技術本部技術部
	柴 田 雄	住友金属工業(株)東京技術部
	森 建 二	東京芝浦電気(株)原子力本部動力炉開発部第1課
	田 辺 潤 平	(株)日本製鋼所鉄鋼技術部
	白 石 隆	日本鋼管(株)技術研究所鋼材研究室
	大 西 敬 三	(株)日本製鋼所室蘭製作所研究所
	深 瀬 幸 重	日本冶金工業(株)川崎製造所研究部
	大 谷 浩 洋	(株)日立製作所電力事業本部 原子力技術本部開発部
	永 井 明	日立造船(株)技術研究所第1研究室
	田 村 友 彦	三井造船(株)千葉研究所原子力研究室

氏 名 所 属

P 3 G

幹 事	羽 田 幹 夫	東京芝浦電気(株)原子力本部
副 幹 事	松 本 圭 司	石川島播磨重工業(株)技術研究所原子力機器部
	笹 倉 一 剛	石川島播磨重工業(株)技術研究所原子力開発室
	平 池 恂	川崎重工業(株)原子力部
	寺 井 清	同 溶接研究室
	小 野 寛	川崎製鉄(株)技術研究所特殊鋼研究室課
	吉 田 照 雄	新日本製鉄(株)鋼管技術部
	三 輪 瑛 逸	同 上
	小 泉 勇	住友金属工業(株)中央技術研究所
	紫 田 雄	住友金属工業(株)東京技術部
	白 石 隆	日本鋼管(株)技術研究所鋼材研究室
	大 西 敬 三	(株)日本製鋼所室蘭製作所研究所
	田 辺 潤 平	(株)日本製鋼所鉄鋼技術部
	佐々木 武	パブコック日立(株)ボイラ原子力設計部
	河 原 愈	(株)日立製作所日立工場原子力開発部
	佐々木 正 祥	同 日立工場原子力開発部
	永 井 明	日立造船(株)技術研究所第 1 研究室
	小 関 安 史	三井造船(株)技術本部原子力事業室
	国 府 哲 郎	三菱重工業(株)神戸造船所原子力設計部新型炉計画課

P 4 G

幹 事	寺 井 清	川崎重工業(株)溶接研究室
副 幹 事	三 好 滋	富士電機製造(株)原子力事業部技術部品質保証課
	富 岡 靖 博	石川島播磨重工業(株)技術研究所原子力開発室
	清 水 茂 樹	川崎重工業(株)原子力部技術第 3 課
	加 瀬 勝 弘	同 原子力部技術第 1 課
	吉 田 照 雄	新日本製鉄(株)鋼管技術部
	三 輪 瑛 逸	同 上
	小 泉 勇	住友金属工業(株)中央技術研究所
	今 泉 徹	住友重機械工業(株)平塚研究所
	杉 本 威 生	住友重機械工業(株)平塚研究所第 2 研究室
	白 石 隆	日本鋼管(株)技術研究所鋼材研究室
	深 瀬 幸 重	日本冶金工業(株)川崎製造所研究部
	田 辺 潤 平	(株)日本製鋼所鉄鋼技術部

氏名	所 属
大 西 敬 三	(株)日本製鋼所室蘭製作所研究所
伊 藤 吉 保	(株)日立製作所日立研究所第3部
津 田 潤	同 日立工場原子力開発部
佐 藤 昭 三	三菱重工(株)高砂研究所溶接研究室

P 5 G

主 査	稻 垣 道 夫	金属材料技術研究所溶接研究所
幹 事	山 香 誠	(株)神戸製鋼所溶接棒事業部技術本部技術部
副 幹 事	大 岡 耕 之	新日本製鉄(株)技術開発部
	谷 岡 慎 一	石川島播磨重工業(株)溶接研究所第2実験部
	平 池 恂	川崎重工業(株)原子力部
	寺 井 清	川崎重工業(株)溶接研究室
	浜 中 孝 通	(株)神戸製鋼所溶接棒事業部
	細 木 繁 郎	新日本製鉄(株)技術開発部
	大 野 章	同 上
	有 井 満	東京芝浦電気(株)重電技術研究所金属技術グループ
	足 立 正 博	日本ウエルディングロッド(株)技術研究所
	白 石 隆	日本鋼管(株)技術研究所鋼材研究室
	三 好 滋	富士電機製造(株)原子力事業部技術部品質保証課
	幡 谷 文 男	(株)日立製作所 日立研究所第5部
	森 沢 潤 一	同 日立工場原子力製造部
	佐 藤 昭 三	三菱重工業(株)高砂研究所溶接研究室

目 次

1. 緒 言	1
2. 調査対象機器の構造概要	2
3. 使用材料の現状と問題点	5
4. 溶接継手の現状と問題点	14
5. 材料および継手に関する時効効果	23
6. 材料および溶接部に関するナトリウム効果	24
7. 材料および継手に関する水側効果	30
8. 問題点と研究開発課題	31
9. 結 言	33

1. 緒言

本調査報告書は高速原型炉の蒸気発生器に関する構造材料および溶接についての現状と問題点を調査した結果を取まとめたものである。

調査対象は高速原型炉蒸気発生器の使用材料および伝熱管の継ぎ並びに異材継ぎに絞った。溶接部を二種類に絞った理由は伝熱管の継ぎに関しては溶接部の欠陥により水・ナトリウム反応等を起こす可能性があり、また異材継ぎに関してはナトリウム配管(SUS304鋼)と蒸発器(2/4Cr-1Mo鋼)間の重要構造部を形成しておりいづれもその施工方法の確立および高温特性が蒸気発生器の信頼性に極めて重要であるからである。

調査内容は使用材料に関しては製造方法および高温特性、溶接部に関しては施工方法および高温特性、またこれ等のナトリウム側および水側の環境効果等を含んでいる。なお水側の環境効果のクロロイオン(Cl⁻)に対する応力腐食割れについては本調査では対象外とした。

本調査報告書の最後には今回の調査結果から明らかになった問題点を集約し昭和51年度以降実施する必要があると考えられる研究開発課題について指標を示した。

2. 調査対象機器の構造概要

高速原型炉の蒸気発生器は蒸発器、過熱器および再熱器から構成される。

機器の型式はいずれもヘリカルコイル型伝熱管を有するシェルアンドチューブ型熱交換器であるがバックアップの型式として直管型伝熱管を有する型式も検討中である。

蒸気発生器および周辺配管の構成および設計条件を図2-1に示す

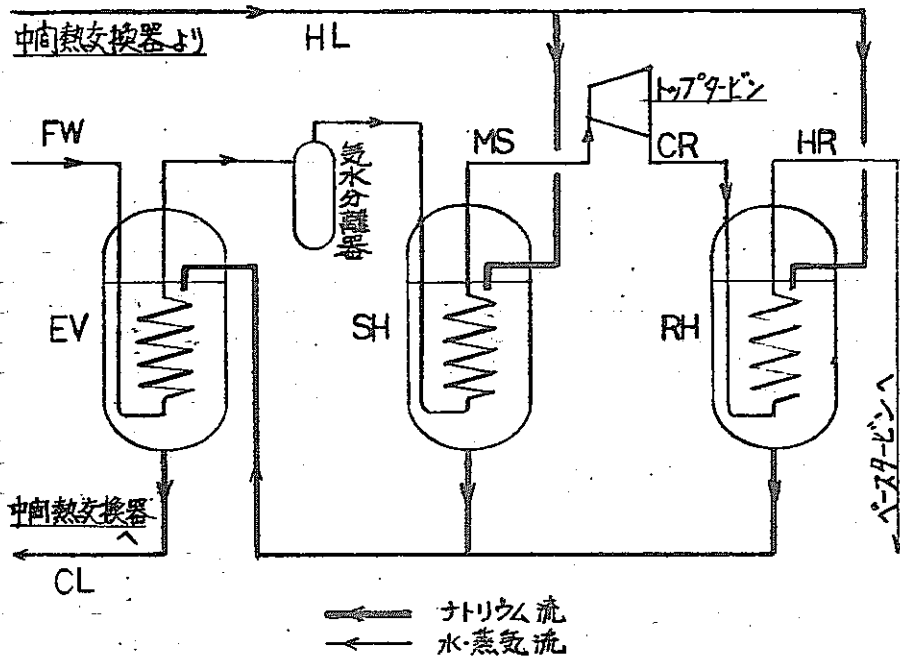


図2-1 蒸気発生器おりの主要流路および設計条件例

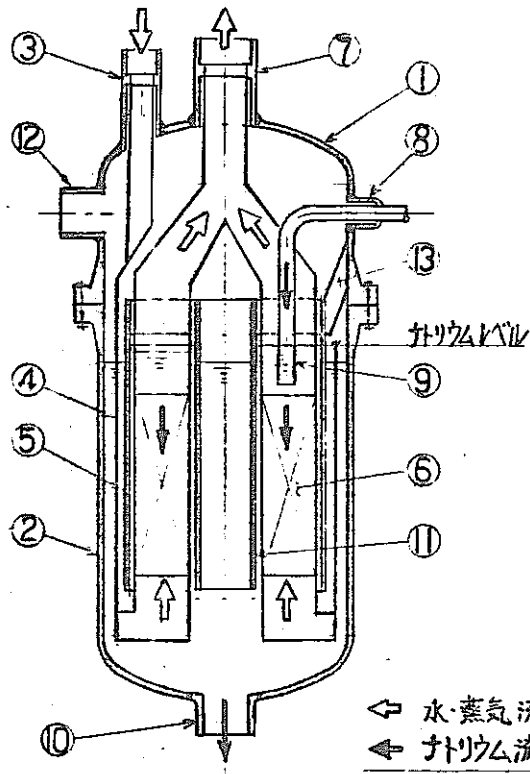
記号	名称	設計条件例	
		圧力 MPa	温度 ℃
EV	シェル	10	470
	伝熱管	163	455
SH	シェル	10	530
	伝熱管	153	525
RH	シェル	10	530
	伝熱管	42	525
HL	ホットレブ	12	530
CL	コールドレブ	14	340
FW	給水	163	254
MS	主蒸気	153	492
CR	低温再熱蒸気	42	335
HR	高温再熱蒸気	42	490

ヘリカルコイル型蒸気発生器の構造例の概要を図2-2に示す。蒸発器、過熱器、再熱器は寸法、細部構造は異なるが基本的には同一構造である。蒸発器の構成材料はシェル、伝熱管とも2号Ct-1M鋼、過熱器および再熱器はオーステナイト系ステンレス鋼(シェルはTYPE304, 伝熱管はろ布リケータにより異なりTYPE304, 316, 321を採用)である。

シェルは胴フランジにより上部①および下部②に分離されている。水(蒸気)は上部シェルに設置した管板③より流入しダウンカム④を通過してヘリカルコイル⑥下部に至る。ダウンカムは水(蒸気)の流れを確保するためシュラウド⑤でナトリウム流路から隔離され収熱を防止されている。ヘリカルコイルを上昇する水(蒸気)は上部シェルに設置したナトリウム分配管④より流入するナトリウムと対向流で熱交換し上部シェルに設置した管板⑦より流出する。シェル内のナトリウムはレベルを有し上部はカバーガス領域である。このカバーガスにより水(蒸気)出入口管板はナトリウムからの熱衝撃を防止されている。ヘリカルコイルの中心部には伝熱管の漏洩による水・ナトリウム反応事故を考慮した内筒⑩を設け反応生成物の放出流路を確保している。この反応生成物は上部シェルに設けた放出口⑨から処理装置へ排出される。

伝熱管のサイズは蒸発器、過熱器では $25.4\phi \times 3.2$ または $31.8\phi \times 3.5 \sim 3.8$ (直管型は

15.9φ×2.0^t~2.3^t), 再熱器では45φ×2.3^tまたは38.1φ×2.3^t(直管型は25.4φ×1.6^t)である。伝熱管の溶接方法は管・管板継手では管内面自動TIG溶接(Internal Bore Weld 以下IBWと略称する), 管・管継手では管外面自動TIG溶接(Orbital Weld 以下OWと略称する)または手動TIG溶接である。本溶接継手の形状例を図2・3に示す。自動TIG溶接は溶加棒なしで施行するがインサートリングを使用することもある。手動TIG溶接は溶加棒を使用する。伝熱管の溶接箇所は管1本当り管・管板継手2ヶ所, 管・管継手は数ヶ所である。



番号	名称
1	上部シェル
2	下部シェル
3	水(蒸気)入口管台
4	ダウンコマ
5	シラウド
6	ヘリカルコイル伝熱管
7	蒸気出口管台
8	ナトリウム入口管台
9	ナトリウム分配管
10	ナトリウム出口管台
11	内筒
12	放出管台
13	内部装置支持板

高速原型炉蒸気発生器の耐圧部はASME CODE CASE 1592(以下CC1592と略称する)を基準の一つとして設計している。

図2・2 蒸気発生器の構造例

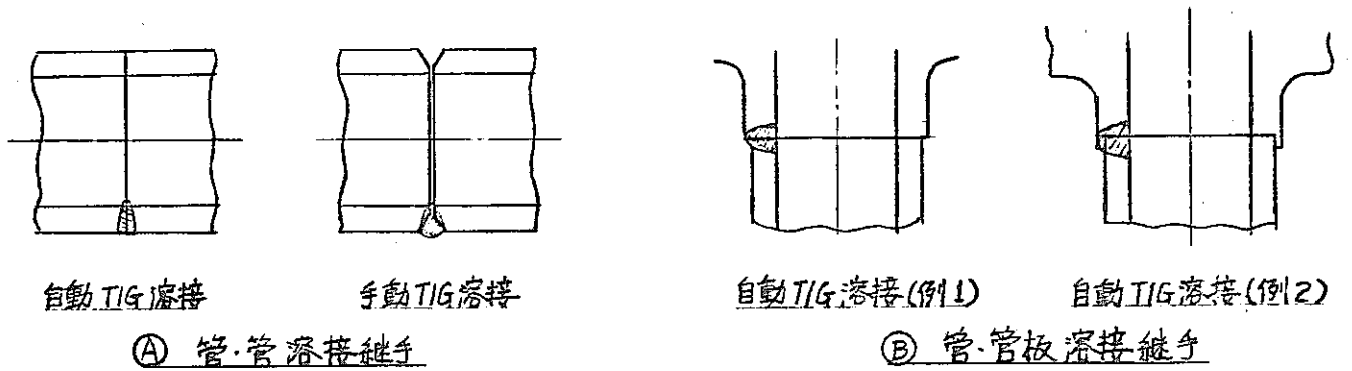


図2.3 管・管および管・管板溶接継手の例

表2・1に高速原型炉蒸気発生器の使用材料および溶接継手に関する設計上の要求値とこれに対処して本調査で定めた基準値と希望値を示す。この希望値は“蒸気発生器の寿命末期における母材および継手の伸び性能が設計値を満足するためには初期状態でどの程度の伸び値を希望すれば良いか”を示す目安値である。伸び値には高温引張特性に関するものおよびクリーフ破断特性に関するものがある。前者は水・ナトリウム反応が生じた場合発生する衝撃力を母材および継手で吸収するのに必要な値を考慮したものであり初期値として高温引張試験における値を採用した。後者はCC1592の歪に関する基準

値を満足するように考慮したもので初期値として 10^4 時間におけるクリープ・ラフ先伸び値を採用した。

以下の各節では本表の数値に基づき使用材料および溶接継手の判定を行った。

表2・1 設計条件における母材および溶接部に要求される特性

	材質	寿命末期における要求値		バジン材(母材)および溶接後(溶接部)の基準値と希望値			
		高温引張特性	クリープ破断特性	高温引張特性		クリープ破断特性	
		衝撃引張による様伸び(%)	1次+2次クリープ伸び(%)	0.2%耐力(kg/mm^2)	伸び(%) (希望値)	10^4 時間における強さ(%)	10^4 時間における伸び(%) (希望値)
母材	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	6	8	CCI592の基準値	20	CCI592の基準値	20
	SUS304	10	8	CCI592の基準値	40	CCI592の基準値	20
	SUS316			CCI592の基準値	40	CCI592の基準値	20
	SUS321			CCI592のSUS304の基準値	30	CCI592のSUS304の基準値	15
溶接部	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	6	UNIFORM歪 3 LINER歪 3 LOCAL歪 6	CCI592の基準値	15	CCI592の基準値	15
	SUS304	10	UNIFORM歪 3 LINER歪 3 LOCAL歪 6	CCI592の基準値	30	CCI592の基準値	15
	SUS316			CCI592の基準値	30	CCI592の基準値	15
	SUS321			CCI592のSUS304の基準値	25	CCI592のSUS304の基準値	10

判定欄には○, Δ, Xの記号を記入して評価したがこの意味は次の内容を示す。

- ：基準値または希望値を満足している。または設計条件で試験されたデータではないが本データより設計条件での基準値または希望値を満足すると推定できる。
- Δ：基準値または希望値を下廻っているが将来満足する可能性がある。またはデータが設計条件で採取されたものでなくまたこのデータから設計条件での数値を推定できない。
- X：基準値または希望値を満足していない。

3. 使用材料の現状と問題点

3.1 管

3.1.1 仕様

蒸気発生器に用いられる伝熱管の寸法及び材質仕様については表3.1に示す。

表3.1 伝熱管の寸法及び材質仕様

機器名	H		M		T		K	
	材質	寸法	材質	寸法	材質	寸法	材質	寸法
蒸気器	STBA24	25.4φ×3.2×約12m	STBA24	31.8φ×3.8×約110m	STBA24	25.4φ×3.2×約17m	STBA24	15.9φ×2.0×約19m
過熱器	SUS304	25.4φ×3.2×約38m	SUS321	31.8φ×3.8×約45m	SUS316	25.4φ×3.2×約36m	SUS321	15.9φ×2.3×約17m
再熱器	SUS304	45φ×2.3×約37m	SUS321	38.1φ×2.9×約33m	SUS316	45φ×2.3×約36m	SUS321	25.4φ×1.6×約16m

(注) 管長は伝熱管1本当りのコイル全長を示す。

3.1.2 製造実績及び製造能力

蒸気発生器用鋼管の製造実績と製造能力に関する国内メーカーの調査結果をまとめて表3.2に示す。表3.2では高速炉用蒸気発生器の実例が少いため他の原子炉用も含めた。

表3.2 蒸気発生器に用いられる鋼管の製造実績と製造能力の調査結果

メーカー	材質	製造法	製造実績					製造能力		出典	
			品名	外径(mm)	肉厚(mm)	長さ(m)	納入量(トン)	納入先	最大寸法(m)		制約条件
S	24Cr-1Mo	マニスマ	蒸気管	25.4	3.2~4.5	11	20	50MW蒸気発生器試験施設	12	超音波設備	P3G-T-002
				38.8	3.8	11					
	SUS321H	直伸押出	過熱器再熱器	31.8	3.5	11	5	50MW蒸気発生器試験施設	18 27	研磨の場合 研磨なしの場合	P3G-T-003
	SUS321	直伸押出	BWR結水ヒーター	15.0	-	24	500	輸出	〃	〃	P3G-T-023
N	SUS304	直伸押出	BWR/BWR 熱交換器	12.7~19.0	-	10	400	原発	〃	〃	P3G-T-023
	SUS316	直伸押出	BWR/BWR 熱交換器	15.9~19.0	-	27	1900	原発	〃	〃	P3G-T-023
N	SUS304	直伸押出	熱交換器	15.9~60.5	1.2~3.9	3~8	3446本	原発	13	検査設備	P3G-T-005
	SUS316	直伸押出	熱交換器	16.0~38.1	1.2~4.0	4	1410本	原発	〃	〃	P3G-T-005
NK	24Cr-1Mo	マニスマ (マニル)	蒸気管	25.4	3.2	10	2	蒸気発生器試験施設	15	水圧試験設備	P3G-Da-028
			蒸気管	19.0	2.8	13	58				
			蒸気管	25.4	2.0	13					
	SUS304	直伸押出	熱交換器	21.7	2.8	13	30	原発	〃	〃	〃
			熱交換器	25.0	1.5	13			〃	〃	〃
			熱交換器	19.0	1.65~2.8	14	150	輸出	〃	〃	〃

高速炉用原子炉用蒸気発生器と用いられる伝熱管の製造については、表3.1の管寸法仕様が15.9φ~45φ×2.0~3.8の範囲に入るもので、製造技術上特に問題はない。今後稼働維持を減らすために長尺管が要求されるとして、検査設備が製造可能長を規定する制約条件となる。24Cr-1Mo鋼管についてはマニスマ製管-冷間伸伸-熱処理の工程をとる

が、オーステナイト系ステンレス鋼管については熟間押し - 冷間曲伸 - 固溶化処理の工程を
とる。

3.1.3 高温特性

蒸気発生器に用いられる鋼管の高温特性を表3.3、表3.4に示す。

表3.3 蒸気発生器に用いられる24Cr-1Mo鋼管の高温特性の調査結果

項目	種別	高温引張特性				711-7°破断特性				備考	出典	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			
		設計温度455°C の基準値 19		引張強さ 20	希望値 20	550°C 10 ⁴ HR 500°C 13 550°C 83		伸び 10 ⁴ HR 20		設計温度455°C		
S	60 ^φ ×8 ^t	400°C 24~27 500°C 23~25	○	400°C 53~55 500°C 45~47	400°C 24~27 500°C 28~31	○	500°C 700 ^{HR} 14 550°C 10 ⁴ HR 11	○	500°C 10 ⁴ HR 30以上 700 ^{HR} 16以上	○	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L	P3G-T022
N	48 ^φ ×7 ^t 57 ^φ ×6 ^t	450°C 20~25	○	450°C 47~50 500°C 42~46	450°C 23~28 500°C 24~28	○	550°C 10 ⁴ HR 11.5~13	○	550°C 10 ⁴ HR 20~37	○	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L	P3G-T006 P3G-DA030
NK	34 ^φ ×9 ^t 50 ^φ ×9 ^t 他	450°C 20.2~24	○	450°C 47~49	450°C 22~23	○	500°C 10 ⁴ HR 15~17 550°C 10~13	○	500°C 10 ⁴ HR 40~55 550°C 10 ⁴ HR 31~44	○	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L	

表3.4 蒸気発生器に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼管の高温特性の調査結果

項目	種別	高温引張強度				711-7°破断強度				備考	出典	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			
		設計温度525°C の基準値 304		希望値 304	希望値 304	550°C 10 ⁴ HR 304 14.7 316 21.2 321 14.7		伸び 10 ⁴ HR 20		SUS321は強度値11.2℃ 1592のSUS304相当の値 (強度は約3割増)	設計温度 525°C	
SUS 304	S	500°C 13~16	○	500°C 43~46	500°C 44~47	○	600°C 10 ⁴ HR 14~16	○	600°C 10 ⁴ HR 21~55	○	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L	P3G-T-021
N	34 ^φ ×6 ^t 48 ^φ ×8 ^t	500°C 15 600°C 13.5	○	500°C 40~45 600°C 37~40	500°C 45~47 600°C 41~44	○	600°C 12~13	○	600°C 13×10 ⁴ HR 16~18	△	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L 711-7°破断伸びは600°C のデータあり	P3G-T-006 P3G-DA030
NK	48 ^φ ×5 ^t 他	500°C 11.8~14	○	500°C 40~45	500°C 38~49	○	600°C 13~15	○	600°C 5×10 ⁴ HR 17~32	△	試験片寸法 5 ^φ ×30 ^φ L他 高温引張伸び判定値上のデータあり 711-7°破断伸びは600°Cのデータあり	P3G-T-032
SUS 316	S	500°C 14~17	○	500°C 48~52	500°C 46~50	○	600°C 18~21	○	600°C 10 ⁴ HR 41~65	○	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L	P3G-T021
N	48 ^φ ×7 ^t 57 ^φ ×6 ^t	500°C 12~14 600°C 11~12	○	500°C 43~45 600°C 41~42	500°C 45 600°C 46	○	600°C 15~17	○	600°C 10 ⁴ HR 18~26	△	試験片寸法 6 ^φ ×30 ^φ L 711-7°破断伸びは600°C のデータあり	P3G-T006 P3G-DA030
NK	48 ^φ ×5 ^t 他	500°C 12~14 600°C 11~14	○	500°C 43~45 600°C 41~42	500°C 45 600°C 46	○	600°C 15~17	○	600°C 10 ⁴ HR 41~60 600°C 2×10 ⁴ HR 33~66	○	試験片寸法 5 ^φ ×30 ^φ L他	P3G-T032
SUS 321	S	500°C 15~20	○	500°C 45~51	500°C 37~45	○	600°C 18~20	○	600°C 10 ⁴ HR 20~39	○	試験片 6 ^φ ×30 ^φ L	P3G-T022
N	48 ^φ ×10 ⁷	500°C 12~14 600°C 11~14	○	500°C 40~44 600°C 40~42	500°C 40~46 600°C 40~47	○	600°C 16~17	○	600°C 10 ⁴ HR 25~35	○	試験片 6 ^φ ×30 ^φ L	P3G-T006 P3G-DA030
NK	44 ^φ ×4 ^t 他	500°C 13.7~16	○	500°C 42~44	500°C 34~39	○	600°C 14~19	○	600°C 10 ⁴ HR 13~32	△	試験片 5 ^φ ×30 ^φ L他 711-7°破断伸びは600°C のデータあり	P3G-DA029

表3.3及び表3.4によれば、0.2%耐力及びクリープ破断強度については各材質について基準値を満足している。高温引張伸び及びクリープ破断伸びのデータは一部希望値を下回るものもある。この点については試験片形状の差異による影響などが考えられる。

3.1.4 問題点

高速原型圧縮空気発生器の伝熱管の仕様寸法の管に対し、標準試験片による設計温度でのクリープ試験が必要である。

3.2 板

3.2.1 仕様

蒸気発生器に用いられる板材の仕様を表3.5に示す。

表3.5 蒸気発生器に用いられるシェル用板材の材質・寸法

形状	機器	ファブリケータ	材質	H			M			T			K		
				A	B	T	A	B	T	A	B	T	A	B	T
	上胴鏡板	蒸発器	24Cr-1Mo	3300	—	52	—	—	—	3300	—	46	—	—	—
		過熱器	SUS304	3100	—	〃	—	—	—	〃	—	〃	—	—	—
		再熱器	〃	3500	—	〃	—	—	—	3700	—	58	—	—	—
	下胴鏡板	蒸発器	24Cr-1Mo	3450	—	35	3900	—	30	3500	—	28	—	—	—
		過熱器	SUS304	3250	—	〃	〃	—	〃	〃	—	〃	—	—	—
		再熱器	〃	3600	—	〃	〃	—	〃	3900	—	〃	—	—	—
	胴板	蒸発器	24Cr-1Mo	4000	8650	33	3500	—	33	3800	—	26	—	—	—
		過熱器	SUS304	2100	8200	〃	〃	—	〃	2800	—	〃	—	—	—
		再熱器	〃	2200	9100	〃	〃	—	〃	〃	—	〃	3000	4000	30

なお、蒸気発生器に用いられる管板の材質・寸法は後述の表3.9に示す。

3.2.2 製造実績及び製造能力

板材の製造実績及び製造能力を表3.6に示す。

シェル用板については、表3.5に示したように、各蒸気発生器ファブリケータ共材質は共通であるが、管板については表3.9に示されているように過熱器、再熱器の材質はファブリケータによって異なっている。

板の用途は主としてシェル用であるが、板厚の薄い管板も一部製造可能寸法範囲にはいるので、表3.6にはその限度を材質ごとに示した。

表3.6 蒸気発生器に用いられる板材の製造実績と能力の調査結果

メーカー	材質	製造法	製造実績				製造能力		出典
			品名	寸法 (mm)	重量 (ton)	納入先	寸法 (mm)	重量 (ton)	
KS	24Cr-1Mo	圧延	化学プラント構造物	最大板厚 268	計約9500	石油化学各社	胴板 設計板厚・幅範囲に対して 板厚×幅×長 33×4000×19M(max) 26×3800×25M(max) 鏡板 板厚 28~52に対し 辺長 4500 [□] (max)	単重 約20 t=52の時 約8	P3G-T-20

ノカ	材質	製造法	製造実績				製造能力		出典
			品名	寸法 (mm)	(納入) 重量 (ton)	納入先	寸法 (mm)	重量 (ton)	
N	24Cr-1Mo	圧延	化学プラント構造物	最大板厚 278 (A387Gr22)	計 8800 (過去5カ年)	石油化学各社	<u>胴板</u> ・設計板厚範囲に対して 板厚×幅×長 33×4000×15M(max) 26×3800×20M(max) <u>鏡板</u> 板厚 28~52 に対し 辺長 4400 [□] (max)	単重 約 18 t=52 のとき 約 8	P3G-T-027 訂1 P3G-T-004
			管板	—	—	—	板厚×直径 310×4000 ^φ	約 20	
	SUS 304	圧延	炉内構造物	最大板厚 228 最大幅の例 板厚×幅×長 55×4470×4490 65×4380 ^φ	計 約 18000	原榮各社	<u>胴板</u> ・板厚 25~33 に対して 幅 4200 ^(max) × 長 10M 又は 幅 (3800~3000) × 長 14M(max) <u>鏡板</u> 板厚 28~52 に対して 辺長 4400 [□] (max)	単重 約 15 t=52 のとき 約 8	
SUS 316	圧延	管板	—	—	—	板厚×直径 "	"		
J	24Cr-1Mo	圧延	化学用その他	厚さ 12~300	単重 0.8~41 計 23160 (過去5カ年)	化学会社他	<u>胴板</u> ・板厚 25~33 に対して 幅 4000 ^(max) × 長 14M 又は 幅 3500 × 長 16M(max) <u>鏡板</u> 板厚 28~52 に対して 直径 4900 ^φ (max)	単重 約 15 t=52 のとき 約 10	P3G-T-027 訂1

表3-6によれば、シエルの胴板、鏡板は製造可能である。管板については、前述のように板厚に制約があるため、少くとも、上表の制限板厚を超える寸法品については鍛造品を使用することになる。

3.2.3 高温特性

板材の高温特性のうち、24Cr-1Mo材を表3.7に、オーステナイト系ステンレス材を表3.8に示す。

表 3-7 蒸気発生器に用いられる 2¼Cr-1Mo 鋼板の高温特性の調査結果

項目	種別		高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典		
			0.2% 耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定	
材質	メカ	寸法 (mm)	設計温度での基準値及び希望値	基準値	—	希望値	—	基準値	—	希望値	設計温度			
				18.2		20		17.0 (10 ⁴ HR)		20 (10 ⁴ HR)	470°C			
2¼Cr-1Mo	KS	板厚 185		31	○	41	27	○	—	—	—	試験片採取位置 ¼t 試験温度 500°C	P3G T-027 追1	
	N	板厚 28		35	○	47	22	○	20	○	38	○	試験片採取位置 ½t 試験温度 500°C	P3G T-027 訂1 追1
	J	板厚 200		33	○	42	27	○	21	○	—	—	試験片採取位置 ¼t 試験温度 500°C	P3G -G-003

表 3-8 蒸気発生器に用いられるオステナイト系ステンレス鋼板の高温特性の調査結果

項目	種別		高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典		
			0.2% 耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定	
材質	メカ	寸法 (mm)	設計温度での基準値及び希望値	基準値	—	希望値	—	基準値	—	希望値	設計温度			
				SUS 304 11.1 SUS 316 12.0		40		SUS 304 17.3 SUS 316 25.4 (10 ⁴ HR)		20 (10 ⁴ HR)	530°C			
SUS 304	N	板厚 25		12	○	38	44	△	18	○	22~32	○	試験片採取位置 ½t 試験温度: 高温引張 600°C クリープ破断 550°C	P3G T-027 訂1
SUS 316	N	板厚 高温引張 25 クリープ破断 30		16	○	47	46	△	16~17	○	22~34	△	試験片採取位置 ½t 試験温度: 600°C	P3G T-027 訂1

表 3-7 によれば、2¼Cr-1Mo 鋼板はデータ数は少ないが基準値・希望値共満足している。

表 3-8 によれば、オステナイト系ステンレス鋼板は、高温引張、クリープ破断共基準値・希望値を超えているが、SUS 304 のクリープ破断試験を除き、試験温度が 600°C と高いため、伸びについては設計温度における値を判定し難く、設計温度におけるデータ採取が必要である。

3-2-4 問題点

高速原形炉蒸気発生器に用いられる板厚に対して標準試験片による設計温度でのクリープ試験が必要である。

3.3. 鍛造材

3.3.1. 仕様

蒸気発生器に用いられる鍛造材は管板、フラニガ、上部平板および管台である。材質は2/4Cr1Mo鋼と304ステンレス鋼が主であるが、管板にはこの外3/16と321ステンレス鋼が用いられる。これらの一覧表を表3.9から表3.12までに示す。

表3.9. 蒸気発生器に用いられる管板の仕様。(単位 mm)

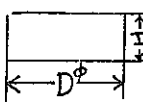
項目		H				M				T				K					
形状	場所	機器	材質	数量	D	H	材質	数量	D	H	材質	数量	D	H	材質	数量	D	H	
	入口	蒸気器					2/4Cr1Mo	6	490	250	2/4Cr1Mo	6	497	270	2/4Cr1Mo	1	810	1000	
		過熱器						321	6	460	250	316	6	407	200	321	1	160	200
		再熱器						321	6	540	250	316	6	508	200	321	1	220	730
	出口	蒸気器	2/4Cr1Mo	1	845	400	2/4Cr1Mo	1	930	350	2/4Cr1Mo	1	815	350	2/4Cr1Mo	1	1810	1000	
		過熱器	304	1	774	350	321	1	860	350	316	1	815	350	321	1	160	200	
		再熱器	304	1	1055	310	321	1	1040	300	316	1	950	300	321	1	280	730	

表3.10. 蒸気発生器に用いられるフラニガの仕様。(単位 mm)

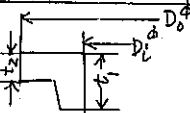
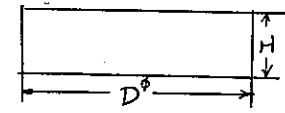
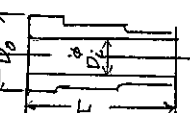
項目		H				M				T				K				
形状	機器	材質	D _o	D _i	t ₁	t ₂	D _o	D _i	t ₁	t ₂	D _o	D _i	t ₁	t ₂	D _o	D _i	t ₁	t ₂
	蒸気器	2/4Cr1Mo	3220	2700	575	275	3600	3000	650	280	3550	2640	700	300	X			
	過熱器	304	3160	2550	610	275	3600	3000	650	280	3550	2640	700	300				
	再熱器	304	3460	2850	610	275	3600	3000	650	280	3750	3100	700	300				

表3.11. 蒸気発生器に用いられる上部平板の仕様。(単位 mm)

形状	機器	材質	D ⁺	H
	蒸気器	2/4Cr1Mo	3600	350
	過熱器	304	3600	340
	再熱器	304	3600	340

*1 = の上部平板はM社のみ用いる。

表3.12. 蒸気発生器に用いられる管台(max)^{*2}の仕様。(単位 mm)

項目		H			M			T			K			
形状	機器	材質	D _o	D _i	L	D _o	D _i	L	D _o	D _i	L	D _o	D _i	L
	蒸気器	2/4Cr1Mo	745	635	350	1000	778	350	820	650	850	1000	610	500
	過熱器	304	630	490	350	1000	778	350	820	650	850	800	470	400
	再熱器	304	630	490	350	1000	778	350	1020	840	1200	700	430	350

*2. H, M社の場合 放出系管台, T社の場合 蒸気出口管台。

3.3.2. 製造能力と製造実績

蒸気発生器に用いられる鍛造材の製造実績と製造能力を表3.13に示す。24Cr1Mo鋼は化学反応用塔槽のニエル材などに大量に使用されているが、原子炉用は比較的少く製品は比較的小型である。要求されている製品形状は製造能力からみて問題はないが、管板に關してはフラット部の溶接性と疲れ強さの関係が高く、清浄度が望まれる。304ステンレス鋼は原子炉用にも比較的多く製造されている。316, 321ステンレス鋼に關しては化学関係装置にかなり実績があるが原子炉用には実績がない。これについても製造能力は十分余裕をもっている。K社の管板は肉厚が大きい、径が小さいので製造可能である。

表3.13 蒸気発生器に用いられる鍛造材の製造実績と製造能力の調査結果

メーカー	材質	製造法	品名	製造実績			製造能力		出典
				寸法 mm	重量ton	納入先	寸法 mm	重量ton	
J	304	鍛造	管板	直径×厚± 4800×180	25.4	ATR	直径×厚± 5000×550	約85	P3G-T008
		鍛造	管台	外径×内径×高さ 1085×885×327	0.8	PWR	外径×高さ 2000×1000	約20	P3G-T014
		鍛造	フランジ	外径×内径×高さ 3250×2754×364	4.5	PWR	直径×厚± 10000×1000	約100	
	316	鍛造	管板	実績なし	—	—	直径×厚± 5000×550	約85	P3G-T008
	321	鍛造	管板	直径×厚± 1595×365	1.57	化学用	直径×厚± 5000×550	約85	P3G-T008
	24Cr-1Mo	鍛造	管板	直径×厚± 580×260	0.53	50MW SG.	直径×厚± 5000×550	約85	P3G-T011
		鍛造	管台	外径×内径×高さ 1435×771×775	4.83	化学用	外径×高さ 2000×1000	約20	社内データ
鍛造		フランジ	外径×内径×高さ 2520×2040×500	4.5	50MW SG.	外径×高さ 10000×1000	約100	P3G-T011	

3.3.3. 高温特性

表3.14に24Cr1Mo鋼の高温特性を、表3.15に304ステンレス鋼の高温特性を示す。24Cr1Mo鋼についてはクリーフ破断伸び値を測定してはいるので判定ができるが、次は304ステンレス鋼の場合は0.2%耐力が肉厚中心部で基準値を下回っており、高温引張り伸び値も36~45%と希望値を下回るものがある。又クリーフ破断伸びは550℃、10⁴時間で約15%と希望値を下回っている。高温特性が基準または希望値を下回っているのは大型品であり、これらの性能を要求される用途として製造されたものであるからである。又316, 321ステンレス鋼については高温特性のデータはない。

表3.14 蒸気発生器に用いられる2号Cr/Mo鋼鍛造材の高温特性の調査結果

種別	高温引張り特性					クリープ破断特性				備考	出典
	0.2%耐力 kg/mm^2	判定	引張り強さ kg/mm^2	伸び $\%$	判定	強さ kg/mm^2	判定	伸び $\%$	判定		
設計温度での基準値と希望値	基準値			希望値		基準値		希望値		設計温度 470°C.	
寸法 mm	18.2			20		17.0 (10 ⁴ hr)		20 (10 ⁴ hr)			
寸法	200	31	0	37	27	0	24	0	7.9 T ₀₁		P3G-RD.014

表3.15 蒸気発生器に用いられる304ステンレス鋼鍛造材の高温特性の調査結果

種別	高温引張り特性					クリープ破断特性				備考	出典
	0.2%耐力 kg/mm^2	判定	引張り強さ kg/mm^2	伸び $\%$	判定	強さ kg/mm^2	判定	伸び $\%$	判定		
設計温度での基準値と希望値	基準値			希望値		基準値		希望値		設計温度 530°C.	
寸法 mm	11.1			40		17.3 (10 ⁴ hr)		20 (10 ⁴ hr)			
寸法	515	10~17	△	41~45	36~45	△	19 (550°C)	0	18.15% (550°C)	△	P3G-T016

3.3.4 問題点

高速原型炉の蒸気発生器に用いられる仕様の鍛造材の標準試験片による設計温度の高温特性試験が必要である。

4. 溶接継手の現状と問題点

4.1 管と管の継手

4.1.1 2/4Cr-1Mo 鋼

(1) 現状

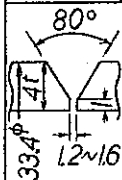
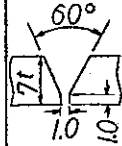
高速原型炉蒸気発生器の蒸発器伝熱管には2/4Cr-1Mo鋼管が使用され、これらの伝熱管同志の継手はO/Wおよび手動TIG溶接により施工される。このような2/4Cr-1Mo鋼管のTIG溶接継手の高温強度についてはきわめてデータが少なく、とくにクリープ破断強度データは皆無である。表4.1にこれらの高温特性の調査結果を示す。なお、管と管の継手の場合には標準試験片の採取が不可能であり、板状試験片が多いために、鋼板のTIG溶接継手より採取した丸棒試験片についても参考のために表中に併記した。

(2) 問題点

上述した現状より抽出した問題点を以下に示す。

- (a) データが不足しており、データの収集を計る必要がある。
- (b) 設計温度における標準試験片での試験を実施する必要がある。

表4.1 2/4Cr-1Mo鋼管-管継手の高温特性の調査結果

項目、種別	高温引張強度				クリープ破断強度				備考	出典	
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ ₂ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
設計温度での標準値 および希望値	基準値 18.7	—	—	希望値 15	—	基準値 19.3 (10 ⁴ h)	—	希望値 15 (10 ⁴ h)	—	設計温度 455°C	
 80° 手動TIG溶接 溶加棒: TGS 2CM(2φ) 予熱:150°C パス数:2パス 後熱:720°C・0.5hFC	—	—	43	—	—	—	—	—	—	1) 試験温度: 500°C 2) 試験片形状 平行部10 ^W (板状) G.L=50	P3G- Ra - 005 (FRW)
鋼管寸法: 34φ×4t 開先形状: V開先	22	○	41	7	△	—	—	—	—	1) 試験温度: 500°C 2) 試験片形状 平行部6 ^W (板 状), G.L=30	P3G- Ra - 005 (FRW)
 60° 手動TIG溶接 溶加棒: YTS 21(1.6φ) 予熱:100~150°C パス数:5パス 後熱:なし	35.5	○	52.1	12.8	△	12.0 (3055h)	△	19.9 (3055)	△	1) 試験温度 引張:450°C クリープ:550°C 2) 試験片形状 平行部5 ^φ (丸 棒), G.L=25	P3G- T-013 (訂1)

注)

1) 破断はいずれも母材破断である。

4.1.2 304 ステンレス鋼

(1) 現状

高速原型炉蒸気発生器の過熱器および再熱器に採用されている SUS304 鋼の伝熱管の継手は管外面自動 TIG 溶接および手動 TIG 溶接により施行される。手動 TIG 溶接は従来より火力発電用ボイラの過熱器に多く使用された実績があるが、管外面自動 TIG 溶接（溶加棒なし）は使用実績が少なく高温特性のデータも少ない。しかし蒸気発生器の伝熱管の継手には管外面自動 TIG 溶接法が主に使用されるので、本溶接法による溶接部の高温特性の調査結果を表 4.2 に示す。

表 4.2 304 ステンレス鋼管 - 管溶接継手の高温特性の調査結果

項目	種別	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
溶接要領	設計温度での基準値 および希望値	基準値	—	—	希望値	—	基準値	—	希望値	—	設計温度	
	溶接要領	11.3			30		18.0 (10 ⁴ h)		15 (10 ⁴ h)		525℃	
I型実合せ	管外面自動TIG溶接 溶加棒なし パス溶接 予熱なし AS WELD	16.4		41.8	23.9						試験温度: 550℃	P39- Da-015
		17.0	○	45.5	37.7	△	22.0 (1.5×10 ⁴ h)	○	15.3 (1.5×10 ⁴ h)	○		

表 4.2 によると、高温特性を試験温度 (550℃) の値で推定すると 0.2% 耐力およびクリープ破断強さは C.C 1592 の基準値を満足している。希望値に対してはクリープ破断伸びがやや上回っているが、高温引張り伸びはバラツキがあり満足しないものもある。

(2) 問題点

以上の結果を考察すると、問題点は下記のようになる。

- (a) 高温引張り伸びの値に非常にバラツキがあり、希望値を満足しないものがある。クリープ破断伸びはほぼ希望値を満足している程度であるが、溶接部の伸び値は試験片の形状、試験片の採取位置等の相違によりバラツキがあるので、これらの関係を明確にし伸び値を正しく評価できるように標準試験片による設計条件での高温特性のデータの収集が必要である。

4.1.3. 316ステンレス鋼

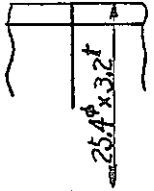
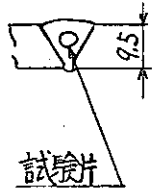
316ステンレス鋼の管・管溶接継手に関する現状と向題点を示す。

(1) 現状

316ステンレス鋼管の溶接は火力発電設備等に多くの使用実績があり信頼性の高いものであるが蒸気発生器に用いられる管外面自動TIG溶接に関しては強度データが非常に少ないのが現状である。

316ステンレス鋼の管・管溶接継手の調査結果を表4.3に示す。

表4.3 316ステンレス鋼の管・管溶接継手高温特性の調査結果

種別 項目	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典	
	0.2%耐力 (kg/mm^2)	判定	引張強さ (kg/mm^2)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm^2)	判定	伸び (%)			判定
設計温度での 基準値 溶接継手 25.4φ×3.2t 管先形状	12.0		—	希望値 30		基準値 266 (10 ⁴ h)		希望値 15 (10 ⁴ h)		設計温度 525℃	
 自動TIG溶接 溶加棒なし 11枚溶接 予熱なし 後熱なし	—		39 ~ 40 溶接金属 で破断	—		—		—			P3G R ₂ 005
 TIG 溶接 溶加棒 16Cr-3Ni -2Mo 61枚溶接 予熱なし 後熱なし 試験片			* 45.4	* 28.2	△	** 24.6 (832.6h)	△	** 19.64 (832.6h)	△	全溶接金属試験 * 538℃ ** 593℃	P3G R ₅ 017

上表に示すように自動TIG溶接ではデータが高温引張強さだけでありデータ不足のため強度の評価はできないが本値よりクリープ強度も有望であると思われる。

TIG溶接のデータは溶接金属の強度試験の値であり熱影響部を含めた継手の強度ではないため、また試験片厚さおよび試験温度が設計条件と異なるため本データより強度の評価は難しいが本溶接方法は有望であると思われる。

(2) 向題点

現状の調査結果から考察した向題点を下記に示す。

- (a) 設計条件での高温特性データが不足している。
- (b) 設計条件において標準試験片による高温特性試験を行う必要がある。

4.1.4 321ステンレス鋼

321ステンレス鋼管の突合せ溶接継ぎの強度に関する現状のデータと問題点を、以下に示す。なお溶接材料としては、347ステンレス鋼を用いた結果である。

(1) 現状

溶接継ぎの溶接条件及び高温特性を調査した結果を、表4.4に示す。

表4.4 321ステンレス鋼、管-管継ぎ高温特性の調査結果

項目	種別	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
開孔形状	設計温度の基準値 及び希望値	11.3 (基準値)		—	25 (希望値)		18.0 (基準値)		10 (希望値)		設計温度 525℃	
U型突合せ	管端面自動 TIG溶接 溶接材料 347系 61℃溶接 予熱なし 後熱なし	25.3 *	○	41.7 5 43.8 *	26.0 5 29.3 **	○	31.3 * (4478hr) 30.0 (5085hr)	○	7.3 * (4478hr) 3.7 (5085hr)	△	試験温度 * 550℃ ** 500℃	P3G Da-019

表4.4の値は、実様の寸法、設計条件のデータがなく、溶接条件と同一の場合の薄板、TIG溶接で模擬したものである。次に高温引張及びクリープ破断の試験結果の例を示す。

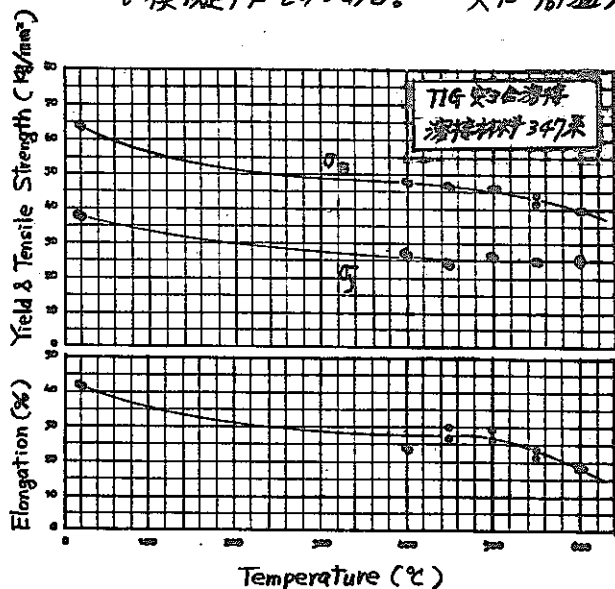


図4.1 321ステンレス鋼管、溶接継ぎの引張性質

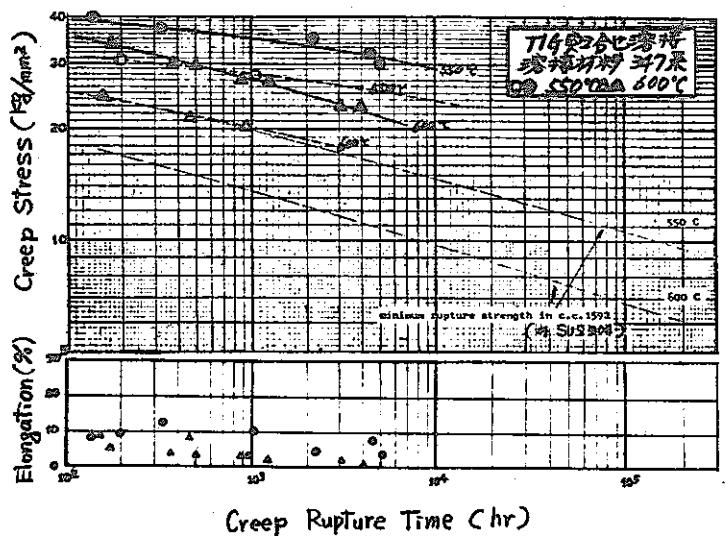


図4.2 321ステンレス鋼管、溶接継ぎのクリープ破断強度、伸び

(2) 問題点

以上の結果を考察すると、問題点は下記の様になる。

- CC.1592には、321ステンレス鋼に対する許容応力の設定がなく、我国独自のデータ収集と許容応力設定が必要であり、希望値について、今後さらに検討する必要がある。
- 高温引張り伸び、クリープ破断伸びが、希望値を満たさない場合があり、今後溶接材料の検討と共に溶接条件の改良を行う必要があり、又設計条件のデータがなく標準試験片による高温特性の試験を、実施する必要がある。

4.1.5 異材継手

(1) 現状

高速原型炉の蒸気発生器に使用を予定されている2/4Cr-1Mo鋼とSUS304鋼の異材継手に関して、高温特性データの調査を行った。異材継手の高温特性については、きわめてデータが少ないが、調査結果をまとめて表4.5に示した。

表で示されるように、試験結果は実際の管のデータではなく、平板を用いた異材継手の試験結果である。従って正確に推定はできないが、この結果からみると、高温引張特性および1万時間迄のクリープ破断特性は基準値、希望値を満足している。

しかし、異材継手のクリープ破断試験においては、破断位置が温度、時間により変わる傾向があり、長時間側のクリープ破断強さ、破断伸びについては、推定することが難しい。また使用予定の管ごとのデータがないために、破断伸びの評価に困難な点がある。

表4.5 異材継手の高温特性調査結果

項目	種別	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
南光	設計温度での基準値 希望値	基準値 18.2		—	希望値 15		基準値 17.0 (104h)		希望値 15 (104h)		設計温度470℃ 2/4Cr-1Moの値を採用。	
	被覆P7溶接 溶接棒 E NiCrFe-3 (NIC703A) 6層6パス 予熱なし 溶接まま	20 5 22	○	45	16 5 23	○	21.5	○	19	○	試験温度 500℃のデータ	P3Cr- Da-017 FRW社 48年度 研究報告

(2) 向題点

上述した現状より抽出した向題点を以下に示す。

- 異材継手に関する高温特性データが不足している。なかでもクリープ破断特性に関するデータがほとんどない。データの収集を促す必要がある。
- 異材継手については、溶接部各位置での強度が異なるために、破断伸びを正しく評価できるように標準試験片による設計条件ごとの高温特性試験が必要である。

4.2 管と管板の継手

4.2.1 2¼Cr-1Mo鋼

(1) 現状

高速原型炉蒸気発生器蒸気器の管と管板の溶接継手はナトリウムと水(または水蒸気)のバウンダリを構成するために、きわめて高品質の溶接部が要求される。このような蒸気器に熱管(引抜管)および管板(鍛造材)には2¼Cr-1Mo鋼が使用され、溶接はIBWにより施工される。これらの管と管板継手の高温強度についてはきわめてデータが少なく、とくにクリープ破断強度データは皆無である。表4.6に高温特性の調査結果を示す。

なお、米国においては、不純物を最小限におさえた清浄度の高い管および管板を採択することにより、より高品質の溶接部を確保しなければならぬという必要性が述べられている¹⁾。また、他の報告²⁾においては、大気溶融材の管と管板の溶接部には母材の不純物に起因した微小な欠陥(Porosity)が生じやすく、このような欠陥により漏洩が発生した事故例を引用している。したがって、母材についてはVAR (Vacuum Arc Remelting) またはESR (Electroslag Remelting) によりできる限り清浄度を高める必要がある。

(2) 向題点

上述した現状より抽出した向題点を以下に示す。

- (a) データが不足しており、データの収集を計る必要がある。
- (b) 設計温度における標準試験片での試験を実施する必要がある。
- (c) 母材の清浄度を高めるためのVARおよびESRにより再溶融した管および管板の試作し、大気溶融材と比較してこれらの溶接性試験を実施し、再溶融の必然性を検討すべき。

表4.6 2¼Cr-1Mo鋼管-管板継手の高温特性の調査結果

項目	種別	高温引張強度				クリープ破断強度				備考	出典	
		0.2% 耐力 (Kg/mm ²)	判定	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (g/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
開 先 状 溶 接 継 手	設計温度での基準値 および希望値	基準値 18.7	-	-	希望値 15	-	基準値 19.3 (10 ⁴ h)	-	希望値 15 (10 ⁴ h)	-	設計温度 455°C	
	溶接方法: IBW 溶加棒: なし 予熱: なし パス数: パス シールドガス: Ar+He 後熱: 685°C・1hFC	28	△	48	11	△	-	-	-	-	1) 試験温度: 450°C 2) スタブ: 溶造 3) 試験片形状 平行部: 10 ^W (板状) GL=50	P3G- Ra- 005 (FRW)
管側	スタブ側	0.4 34φ 348φ	0.6	348φ								
管側	スタブ側	0.4 15.1φ 159φ	10	159φ								
	溶接方法: IBW 溶加棒: なし 予熱: なし パス数: パス シールドガス: Ar+He 後熱: 700°C・0.5hFC	-	-	43	-	-	-	-	-	-	1) 試験温度: 450°C 2) 試験片形状: 管状	P3G- Da- 012 (FRW)

注)

1) 破断はいずれも母材破断である。

- 1) R.W. McClung et al, "Fabrication and Inspection Development for ORBRP Steam Generators" International Conference on Materials for Nuclear Steam Generators, Report No. C.7, Sept., 1975
- 2) J.S. Armiijo and G.J. Licina, "Cleaning, Disassembly, and Inspection of Sodium-Heated Steam Generator Models" Report No. 73-Pwr-15

4.2.2 304 ステンレス鋼

(1) 現状

高速原型炉蒸気発生器の過熱器および再熱器に採用されているSUS304鋼の伝熱管と管板の継手は溶接設計条件から管内面自動TIG溶接（溶加棒なし）により施行される。管内面自動TIG溶接による溶接部の高温特性の調査結果を表4.7に示す。

表 4.7 304 ステンレス鋼 管-管板溶接継手の高温特性の調査結果


項目	種別	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典	
		0.2%耐力 (Kg/mm ²)	判定	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (Kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
南先形状	設計温度での基準値 溶接要領 および希望値	基準値 11.3	—	—	希望値 30	—	基準値 18.0 (10 ⁴ h)	—	希望値 15 (10 ⁴ h)	—	設計温度 525℃	
	 I型実合せ	管内面自動TIG溶接 溶加棒なし Iパス溶接 予熱なし AS WELD	16.7 19.1	○	41.4 43.3	30.9	△	17.0 (0.9×10 ⁴ h)	△	9.0 (0.9×10 ⁴ h)	△	試験温度 550℃

表4.7によると、高温特性を試験温度（550℃）の値で推定すると0.2%耐力はCC1592の基準値を満足しており、クリープ破断強さは試験温度550℃ではやや下回っているが、設計温度525℃では基準値を満足するものと考えられる。希望値に対しては高温引張伸びおよびクリープ破断伸びのいずれも満足していない。特にクリープ破断伸びが希望値を大きく下回っている。

(2) 向題点

以上の結果を考察すると、向題点は下記のようになる。

- 高温引張り伸びおよびクリープ破断伸びが希望値を下回っている。溶接部の伸び値は試験片の形状、試験片の採取位置等の相違によりバラツキがあるので、これらの関係を明確にし伸び値を正しく評価できるように標準試験片による設計条件での高温特性のデータの収集が必要である。
- クリープ破断強さは試験温度550℃のため基準値をやや下回っているが、設計温度525℃での高温特性のデータがないので判定できず、今後設計条件での高温特性のデータの収集が必要である。

4.2.3 316ステンレス鋼

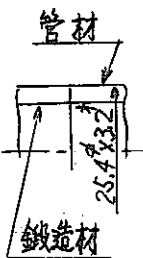
316ステンレス鋼の管・管板継手に関する現状と問題点を示す。

(1) 現状

管・管板の溶接は構造上管内面自動TIG溶接で施行されるが本溶接方法は比較的歴史が新しく強度に関するデータが非常に少ないのが現状である。

316ステンレス鋼の管・管板継手の調査結果を表4・8に示す。本表に示す値は昭和47年、48年度にFRW小委員会で実施された試験データの一部で管材と鍛造材の管内面自動TIG溶接の試験結果である。

表4.8 316ステンレス鋼の管・管板溶接継手高温特性の調査結果

種別 項目	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	出典	
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	判定	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)			判定
設計温度での 溶接要領 開先形	基準値 12.0		—	希望値 30		基準値 26.6 (10 ⁴ ℓ)		希望値 15 (10 ⁴ ℓ)		設計温度 525℃	
	—		39 ~ 41 溶着金属 で破断	—		—		—		P3G Ra-005	

上表に示すように本継手に関するデータは高温引張強さだけである。従って継手特性の評価はできないが本データからクリープ破断特性も有望であると思われる。

(2) 問題点

現状の調査結果から考察した問題点を下記に示す。

- (a) 設計条件での高温特性データが不足している。
- (b) 設計条件において標準試験片による高温特性試験を行う必要がある。

4.2.4 321 ステンレス鋼

321 ステンレス鋼管と管板の内面TIG溶接継ぎの強度に関する現状データと問題点を以下に示す。なお溶接材料としては、347 ステンレス鋼を用いた結果である。

(1) 現状

溶接継ぎの溶接条件及び強度データと希望値について表4.9に示す。

表4.9 321 ステンレス鋼、管-管板継ぎ高温特性の調査結果

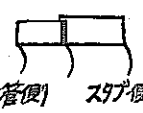
項目	種別	高温引張特性				717°破断特性				備考	出典
		0.2% 耐力 (kg/mm ²)	判定	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (希望値)	強さ (kg/mm ²)	判定	伸び (%)	判定		
用先	設計温度の基準値	(基準値)			(希望値)	(基準値)		(希望値)		設計温度	
形状	溶接要領	11.3		—	25	18.0 (10 ⁴ hr)		10 (10 ⁴ hr)		525℃	
	 管内自動 TIG 溶接 ・溶加棒 347系 ・11°ス ・予熱なし ・後熱なし 管側 スラブ側 突合せ	—	—	39.2 ~ 44.3 *	25.3 ~ 28.5 *	○	—	—	—	* 試験温度 500℃	

表4.8に示す様に、管と管板の継ぎの強度データは、引張強度のみである。次に、高温引張と、短時間での717°試験結果の例を示す。

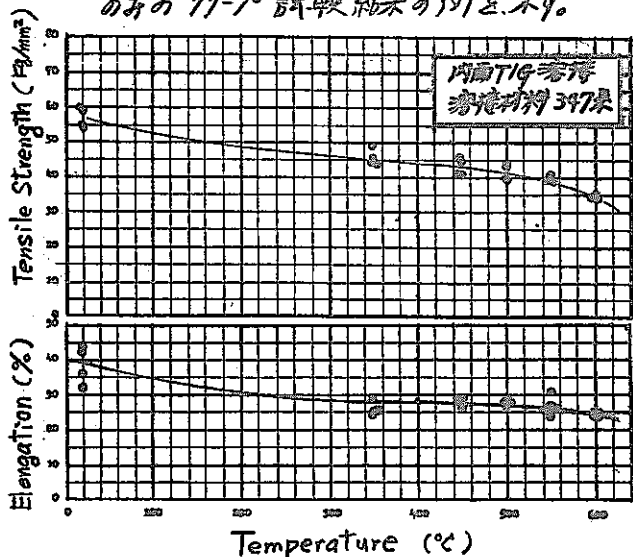


図4.3 321ステンレス鋼、管・管板、溶接継ぎの引張性質

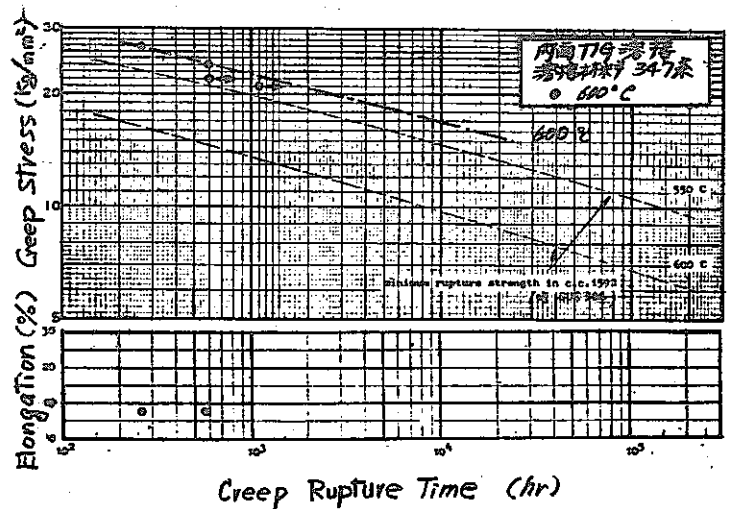


図4.4 321ステンレス鋼、管・管板、溶接継ぎの717°破断強度伸び

(2) 問題点

以上の結果を参考すると、問題点は下記の様になる。

- a) CC1592には、321 ステンレス鋼に対する許容力の設定が小さく、我々独自のデータ収集と許容力設定が必要であり、希望値について今後さらに検討を加える必要がある。
- b) 高温引張り伸び、717°破断伸びが希望値を満たさず、場合によっては今後溶接材料の検討と共に、溶接条件の改良を行う必要がある。又、設計条件のデータが全くなく、標準試験片による高温特性の試験を、実施する必要がある。

5 材料および継手に関する時効効果

5.1 現状

高速原型炉の蒸気発生器に使用を予定している材料の中で、時効効果が大きいと思われる $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼について、母材および溶接継手に関する時効後の高温特性データを調査した。調査結果はまとめて表5.1に示した。

時効条件に示されるように、設計温度での時効データはほとんどなく、調査データも母材については非常に高温での時効となっており、試験温度も高温である。従って強度低下も当然大きくなっていく。

設計温度での時効効果を表5.1から推定するのはやや困難であるが、傾向としては、室温における引張強さの変化は少なく、高温での引張強さは低下する。また破断伸びは、時効の影響が小さい。クリープ破断強さも長時間側では時効前後の差は小さくなる傾向がある。

しかしデータが乏しいために、母材および継手について明確な傾向がつかめないのが現状である。

表5.1 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の時効後高温特性調査結果

種類	種別 時効条件	高温引張特性			クリープ破断特性		備考	出典	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	強さ (kg/mm ²)	伸び (%)			
母材	時効前	18.7	34.5	30	6.0	40	試験温度は 高温引張特性 550℃ クリープ破断特性 600℃	P3G-Ra-013	
	650℃・5000h	13.0	27.8	28	4.6	44			
同材継手	TIG溶接 添加剤 粒(YT521)	時効前	30.0	43.2	16 (母材)	10.0	20 (3000h)	試験温度は 550℃	P3G-Da-013
	7本母材	550℃・500h	21.8	32.7	18 (母材)	10.0	24 (3200h)		
異材継手 ($2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$) (SUS304)	被覆アーク溶接 溶接棒 ENIGFe-3 (NIC703A)	時効前	19.5	42	22 (母材)	10.5	18 (4600h)	試験温度は 550℃	FRV年 48年度研究報告
	20本母材	550℃・3000h	16	32	18 (母材)	10.0	26 (6000h)		

5.2 尚題点

上述した現状より抽出した尚題点を以下に示す。

- (1) 時効効果に関するデータが不足している。設計温度付近でのデータは、ほとんどなく、収集が必要である。
- (2) 長時間の時効効果を正しく評価できるように、母材および継手に関して標準試験片による設計条件での試験が必要である。

6. 材料および溶接部に関するナトリウム効果

6.1 2¼Cr-1Mo鋼

高速原型炉蒸気発生器の蒸気器に使用される2¼Cr-1Mo鋼のナトリウム効果について調査した結果を表6.1に示す。なお、一般的に試験温度は設計温度(455°C)よりもかなり高い。また、図6.1および図6.2に脱炭速度およびクリープ破断強度に関するナトリウム環境効果の一例を示す。

表6.1 2¼Cr-1Mo鋼ナトリウム環境効果の調査結果

項目	評価	問題点	出典
腐食および質量移行	<p>1) 質量移行に関しては、材料の熱処理依存性が認められ、Ann材はNT材に比較して、その程度が大きい。また脱炭速度についても熱処理依存性があり、Ann材はArmijoらにより提案された実験式およびKrankotaらにより提案された平均脱炭速度よりも大であるが、NT材の場合にはAnnより小で、浸漬温度が低くなるにつれてAnn材との差が大きくなり、設計温度(460°C)においては上記の実験式を満足する。ただし、最大浸漬時間は3000hである(図6.1参照)</p> <p>2) 溶接継手のデータがないために溶接部の特性については不明である。</p>	<p>1) 材料の熱処理条件が質量移行および脱炭速度におよぼす影響についてはさらに長時間浸漬材についても検討する必要がある。</p> <p>2) 溶接部については今後データを収集する必要がある。</p>	<p>P3G-F-017</p> <p>P3G-F-018</p>
高温引張	<p>1) 熱履歴材とNa浸漬材の高温引張特性には有意と思われる差がないとする報告がある。いっぽう、他の報告では、550°Cで1000h浸漬した母材、溶接継手の0.2%耐力および引張強さは未浸漬材に比較してかなり低く、とくに母材が顕著である。</p> <p>2) 溶接部については母材に比較してデータが少ない</p>	<p>1) データをさらに充実する必要がある。</p> <p>2) 溶接部についてもデータを収集する必要がある。</p>	<p>P3G-F-029</p> <p>ISES 7502</p> <p>ISES 7502</p>
クリープ破断	<p>1) 未浸漬材および浸漬材を比較すると、短時間側ではかなりの強度差があるが、これはNa中での脱炭と同時に長時間高温にさらされたための組織変化によるものである。しかし長時間側では組織変化の差はほとんどなく、強度差も認められずである。したがって、本質的にはNaによる影響は小さいと考えられる(図6.2参照)。いっぽう、若干強度が低下するという報告もある。</p> <p>2) 溶接部についてはデータがないため不明である。</p>	<p>1) データをさらに充実する必要がある。</p> <p>2) 溶接部についてはデータを収集する必要がある。</p>	<p>ISES 7502</p>
	<p>1) データなし</p>	<p>1) 溶接部を含めて今後データを収集する必要がある。</p>	
疲れ強さ	<p>1) 種々の雰囲気(大気中、He中、溶存酸素量が10ppm以下および約300ppmのNa中)にて593°Cにおける両振り定歪み(3cp/m)疲労試験結果より、大気中のものに比較して他の雰囲気のもの5~20倍の強度を有し、長寿命側になるにつれてその比は大きい。しかし溶接部についてはデータがないため不明である。</p>	<p>1) 溶接部についてはデータを収集する必要がある。</p>	<p>ISES 7502</p>

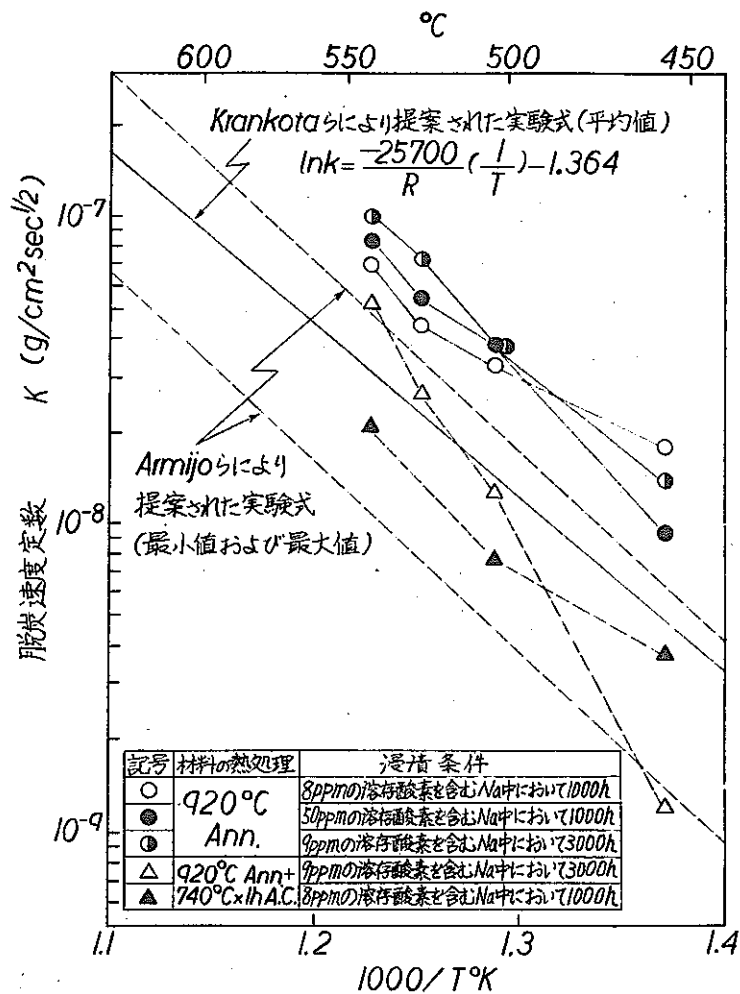


図6.1 浸漬温度および材料の熱処理が脱炭速度定数におよぼす影響

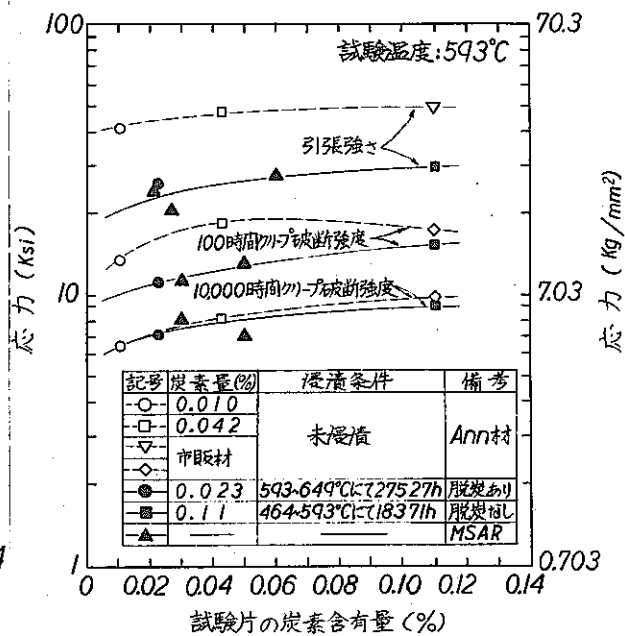


図6.2 2/4Cr-Mo鋼のクリープ破断応力と試験片の炭素含有量の関係

6.2 304 ステンレス鋼

高速原型炉蒸気発生器の過熱器および再熱器の設計温度におけるナトリウム環境効果の調査結果を表6.2に示す。

表6.2 304 ステンレス鋼に関するナトリウム環境効果の調査結果

項目	評価	向題点	出典	
腐食および質量移行	(1) 一般腐食は設計温度では30年間で0.13mm程度で僅かである (2) 局部腐食は0.25mmを考慮する考案があるが、データの収集が必要 (3) 蒸気発生器のSUS304は脱炭素浸炭の方が向題点であり浸炭により表面炭素濃度が0.12%以上になる場合がある。	(1) 局部腐食0.25mmを取る考案があるが、今後のデータにより検討する必要がある。 (2) 浸炭による表面炭素濃度が0.12%以上になる場合がある。	Nettelyのデータ Goldmann S.A Shiels et al	
高温引張	強さ	(1) 蒸気発生器の設計温度では強さの低下は問題とはならずむしろ上る傾向になる。 (2) 649℃高炭素ナトリウム浸炭で強さが10%低下する場合がある。	P3G-Da-031	
	伸び	(1) 浸炭により伸びが低下する。 (2) 649℃高純度・高酸素ナトリウム浸炭では伸びが低下するが急激ではないが、高炭素ナトリウム浸炭では伸びが50%近く低下する。	(1) 上記(1)(2)および(3)項と同様 (2) 伸びの低下は起動・停止および事故時の設計基準の決定に考慮が必要	P3G-Da-031
クリープ	破断強さ	(1) 649℃の浸炭では強さは若干低下し長時間に亘るほど低下率が大きくなる傾向がある。(図6.3参照)	(1) 溶接部に対するデータがない。 (2) 蒸気発生器の設計温度(他)のデータがない。 (3) 環境効果の定量化がされていない。	ISES 7502
	破断伸び	(1) 649℃の浸炭では、1軸クリープ試験で2次クリープまでは環境効果は認められないが、3次クリープでは歪量が著しく減少する。 (2) 浸炭により伸びが低下する。	(1) 上記(1)(2)および(3)項と同様 (2) 伸びの低下は起動・停止および事故時の設計基準の決定に考慮が必要	ISES 7502
疲れ強さ	(1) 繰返しひずみと破断繰返し数の関係ではナトリウム環境のデータでは全般に大気中のデータに近く高酸素ナトリウム中ではひずみ長寿命側で大気中のデータと下回り、高炭素ナトリウム中では逆に高ひずみ短寿命側で大気中のデータよりも低下する。(図6.4参照)	(1) 溶接部に対するデータがない。 (2) 環境効果の定量化がされていない。	MSAR67-103	

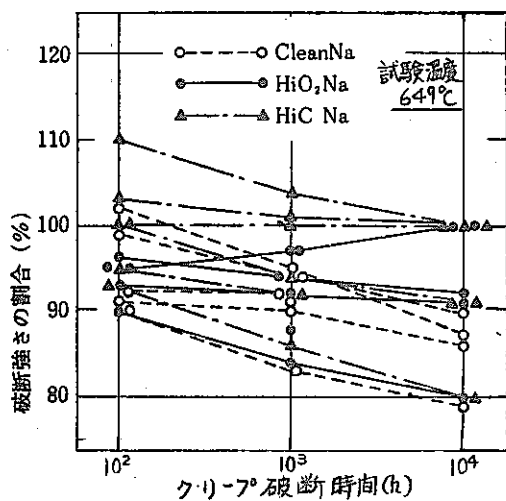


図6.3 304 ステンレス鋼のクリープ破断強さ(大気)に対する割合とクリープ破断時間の関係

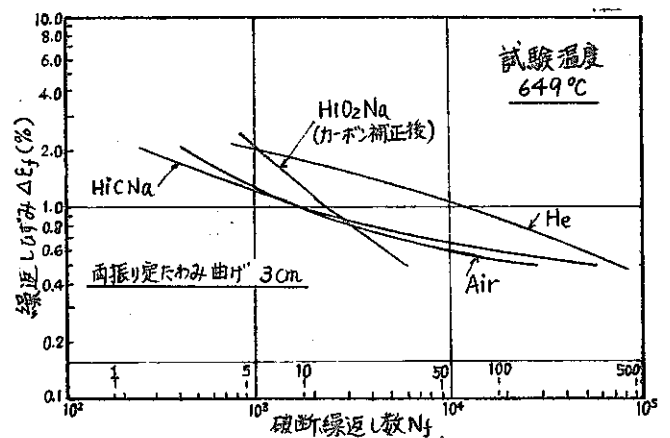


図6.4 304 ステンレス鋼の大気中、ナトリウム中、高酸素ナトリウムおよび高炭素ナトリウム中における繰返し寿命の比較

6.3 316 ステンレス鋼

316 ステンレス鋼のナトリウム環境効果を過熱器、再熱器の伝熱部の実機条件(温度510℃~450℃、酸素濃度約10ppm、流速1m/sec以下)を想定して評価した。

表 6.3 316 ステンレス鋼のナトリウム環境効果の調査結果

項目	評価	問題点	出典
腐食 および 質量移行	(1) 一般腐食は30年間で30 μ m(流速3m/sec)以下。 (2) 粒界腐食は250 μ m。 (3) 表面変質は10~20 μ m。	(1) 一般腐食は局部的に高酸素Naが生じた場合に著しくなる可能性がある。 (2) 粒界腐食は数 μ mから250 μ mMAXとデータ幅が広いので更に集積が必要。 (3) 溶接部のデータ不足。	P3G-T-033 IAEA/SM130 Nottt. Conf.
	(4) 浸炭は30年間で表面炭素濃度1~2%深さ数100 μ m程度。 (5) 脱炭は評価不必要。	(1) 浸炭はNa中炭素濃度に強く影響をうける。実機のNa中炭素濃度を評価する必要あり。 (2) 長時間浸漬後では低温側ほど表面炭素濃度が高くなるが予想される。 (3) 浸炭データの集積必要、溶接部データ不足	P3G-T-033
高温 引張	強さ (1) 浸漬時間とともに若干上昇傾向で強度低下の可能性は少ない。	(1) 溶接部のデータ不足。	P3G-T-033
	破断伸び (1) 浸漬時間とともに減少傾向。 (2) 高酸素Na 649℃、4000時間浸漬で10%以上減少する。(649℃引張)	(1) 浸炭とともに時効効果と考慮する必要あり。 (2) 局部的に浸炭が大きくなった場合の延性低下を考慮する必要あり。 (3) 溶接部のデータ不足。	P3G-T-033
クリープ	破断強さ (1) 浸漬時間とともに上昇傾向で強度低下の可能性は少ない。(図 6.5) (2) 高炭素Na中 649℃、1000時間で20%程度上昇(大気中との比較で)。	(1) データ集積必要、溶接部のデータ不足。	P3G-T-033
	破断伸び (1) データ不足で評価できず	(1) 浸炭が破断伸びを低下させることが予想される。 (2) 母材、溶接部のデータ不足。	P3G-T-033
疲れ強さ	(1) 大気中とほぼ等しいが高酸素Na中では低歪振中で大気中より低下、高炭素Na中では高歪振中で低下の傾向あり。(図 6.6)	(1) 浸炭のみならず腐食等ミクロな因子の影響を考慮する必要あり。 (2) データの集積必要、溶接部のデータ不足	P3G-T-033

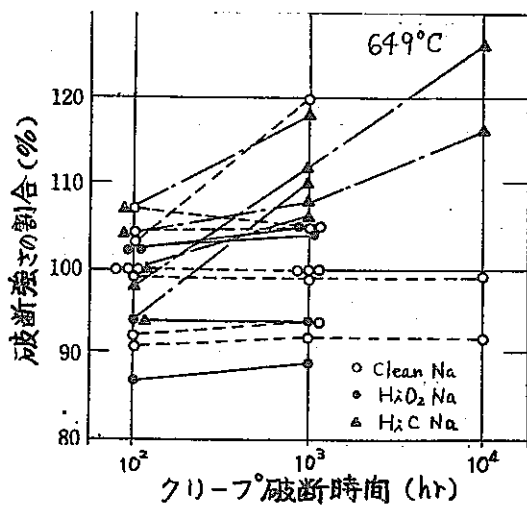


図 6.5 SUS316の大気中に対するクリープ破断強さ割合。(ISES 7502)

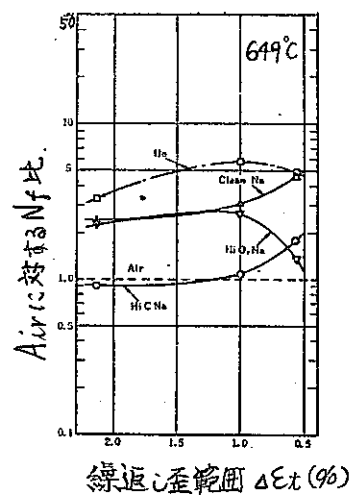


図 6.6 SUS316の大気中に対する疲れ寿命比。(ISES 7502)

6.4 321 ステンレス鋼

321 ステンレス鋼管の母材及び溶接継ぎのNa環境効果に関しては、強度データは非常に少なく特に溶接継ぎに関しては、全くデータがない状態である。以下に現状データと総括し、高温引張と疲労試験結果の例を示す。

表6.4 321 ステンレス鋼 Na環境効果の調査結果

項目		評価	問題点	出典
腐食及び 質量移行		(1) 一般腐食は、設計温度、30年後で約10~20 μm で、高酸素Na中では、25~50 μm が予想される。又粒界腐食は、高2 μm (粒) (2) SgのNa環境下では脱炭は起らず、浸食が起る。一般にSUS 321, 304, 316共に浸食の抵抗性は高く、量はわずかであると考えられる。	(1) 局所的な高酸素濃度Naでは、局部腐食のデータが必要。 (2) 浸食に関するデータが不足している。 (3) 腐食、質量移行共に溶接継ぎのデータがない。	¹⁾ P39-Ro-015 ²⁾ P39-Ta-031
高温 引張	強さ	現状のデータは、室温で強度が減少する高温側(500 $^{\circ}\text{C}$)で変化なし(図6.7参照)	(1) 長時間浸漬によるデータがない。 (2) 高炭素Na中は、強度変化が大きい事が予想されデータ蓄積が必要。	P39-Ta-031
	伸び	室温、高温側共に伸びは減少がみられるが、変化は小さい。(図6.7参照)	(3) 溶接継ぎに対するデータがない。	
711-7 ^o	破断強さ	現在データなし。	(1) 口内ではデータが皆無であり、積極的データ蓄積を要する必要がある	—
	破断伸び			
疲れ強さ		中純度Na(30~90 ppm O ₂)中での疲労引張強さは、短寿命側で寿命比1.6倍、高寿命側で10倍程度である。(図6.8参照)	(1) 長時間Na浸漬による疲労強度データが必要 (2) SUS321以外の鋼種と同条件で比較が必要がある。	P39-Ta-031

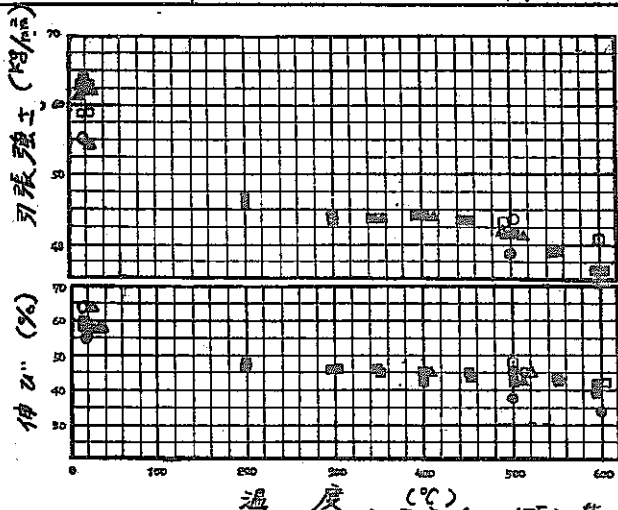


図6.7 SUS 321, SUS 304のNa浸漬後の引張性質

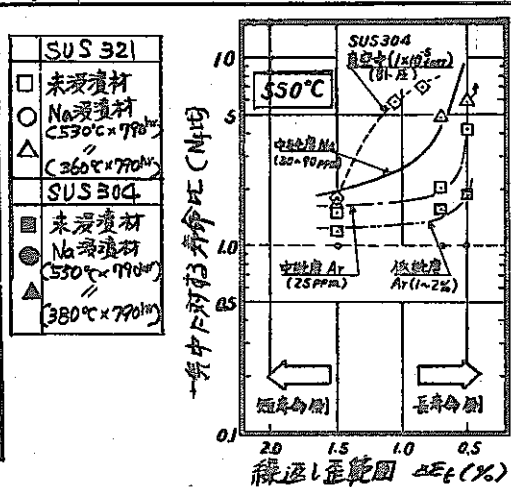


図6.8 各種雰囲気中のSUS321の疲労引張強さ

6.5 異材継手

(1) 現状

異材継手についてNa中の挙動を調査した例は少なく、さらに強度について調査したものは、ほとんどない。2/4Cr-1MoとSUS304との異材継手について、Na中浸漬試験を行った結果によると、母材と同様にHot legでは重量減、Cold legでは重量増の傾向が見られる。表面付着物は、継手の各位置で異なっているが、質量移行や2/4Cr-1Mo側での脆化は生じていない。(1)

また高速実験炉におけるNa浸漬後の異材継手の引張試験結果では、母材と同じ傾向にありNa浸漬の影響は認められない。しかし継手試験片の形状が異なるものもあり、破断位置は異なる場合がある。(2)

(2) 尚懸案

上述した現状より抽出した尚懸案を以下に示す。

- (a) 異材継手のNa中の挙動に関して調査した例が少なく、腐食、質量移行などの傾向が明確でない。データを収集する必要がある。
- (b) Na浸漬後の強度調査を行った例がきわめて少なくデータを収集する必要がある。また異材継手について、正しく評価するために標準試験片による設計条件ごとの試験が必要である。

出典 (1) FNA委 昭和49年度研究報告

(2) ISES 7502

7. 材料及び継手に関する水側効果

一般に、蒸気発生器の伝熱管内面は、高温の水或は水蒸気に触れるために色々な腐食現象が発生することが知られており、その対策に多くの労力がはらわれて来た。高速炉の蒸気発生器と云えども従来開発された種々の処理法が適用されるべきであることは言う迄もなく、最近、諸外口の高速炉2次側水系では、水処理不良、Na・水反応、コンデンサー・リークなどが原因となってアルカリ環境が生ずる可能性が指摘され、濃縮条件如何によつては、①応力腐食割れ、及び②DNB^{*}領域における腐食疲労が懸念されている。諸外口では、この問題について積極的に調査、研究が行なわれている。1975年、蒸気発生器材料に関するガトリンバーグ会議で発表された諸論文のうち、特に詳細な米国の研究成果を要約すると下表

表 7.1 水側効果の調査結果

環境 及び 試験法 試験材料	33% NaOH 沸騰水中 定歪速度 } 313張 定荷重 }	3, 5, 10% NaOH 600°F 定歪速度 } 313張 定荷重 }	U-Bend試験片 を飽和と過熱(900°F)水蒸気(含アル カリ)に交互にさせる	5~10ppm NaOH 900°F 内圧テスト
2 ¹ / ₂ Gn-1Mo { Ann NT QT CW W	大 SCC — 中 SCC 小 SCC —	NO SCC NO SCC — NO SCC NO SCC	} NO SCC	NO SCC NO SCC — —
Incoloy 800 { Ann CW S W	—	SCC minor SCC — —		} NO SCC
SUS 304	—	Ann & S SCC 3% NaOH	—	

但し、Ann:焼鈍, NT:焼準・焼なまし, QT:焼入水・焼なまし, CW:冷間加工, S:鋭敏化, W:溶接

表中 SCCは Stress Corrosion Cracking の略

の様)になる。

これらの知見をもとに、我々が当面する課題として試験、研究を必要とする事項を挙げれば、下記の如くである。

- ① 2¹/₂Gn-1Mo は問題が少なくなるが見えるが、改めて確性試験が必要である。特に溶接部のデータが極めて少なく、SUSとの異材継手については殆どデータなし。
- ② SUS材料はアルカリ腐食に対して敏感であり、設計条件、実機運転条件決定のために必要なデータを得なければならぬ。
- ③ 伝熱管の水側特異臭たる DNB^{*}域における腐食疲労特性を把握する必要がある。

*註: DNB は Departure from Nucleate Boiling の略

8. 向題点と研究開発課題

各章において指摘された向題点と材料、溶接および環境効果の3つの大項目、さらに各大項目内の区分に対して対応させ、それに対し提案される研究開発(試験)項目と対応させるものを表8.1に示す。表8.1以外にも使用寿命末期(EOL)における材料性質の検査、ガンマ線検査法および溶接時ガス圧制御装置などの提案があるが、本グループで検討した向題点の範囲外であるため割愛する。

表8.1 高速原型炉蒸気発生器の材料および溶接に関する向題点と研究開発課題

種 別		向 題 点	研 究 開 発 課 題
大項目	区 分		
材 科	管 材	実機寸法に基づく標準試験片に対する設計温度でのクリープ試験データの不足	クリープ特性試験(10 ⁴ H以上)
	板 材	同 上	同 上
	鍛 造 材	実機寸法に基づく標準試験片に対する設計温度での高温特性試験データの不足	高温引張特性試験 クリープ特性試験(10 ⁴ H以上)
溶 接 継 手	管-管溶接継手	(1) 高温特性データの不足 (2) 実機寸法に基づく標準試験片に対する設計温度での高温特性試験データを採取する必要がある。	高温引張特性試験 クリープ特性試験(10 ⁴ H以上)
	管-管板溶接継手	(1) 高温特性データの不足 (2) 実機寸法に基づく標準試験片に対する設計温度での高温特性試験データを採取する必要がある。 (3) 2%Cr-1Mo管および管板材の溶接継手部に対する母材清浄度の影響を確認する必要もある。	高温引張特性試験 クリープ特性試験(10 ⁴ H以上) VAR材およびESR材と大気中溶製材の機械的特性の比較 高温引張特性試験 高温疲労特性試験 クリープ特性試験
	異材継手	(1) 高温特性データの不足 (2) 実機寸法を考慮した異材継手部の試験片に対する設計温度での高温特性試験データを採取する必要がある。	高温引張特性試験 クリープ特性試験

種 別		向 題 点	研究開発課題
大項目	区 分		
環 境 効 果	水側環境効果	アルカリ環境応力腐食割れに関する データ不足 (母材, 溶接部共)	NaOH 環境中における各種発生条件に 対する応力腐食割れ発生確認試験 (母材および溶接部手に対し)
	Na側環境効果	(1) Na 環境中における溶接部部の高温 特性データの不足	溶接部部の (1) 高温引張特性試験 (Na 曝露後) (2) クリーフ特性試験 (Na および 曝露後) (3) 疲労試験
		(2) 2%Cr-1Mo 鋼の脱炭および ステンレス鋼の汚炭について (a) 脱炭および汚炭に対する各種 条件の効果より定量化する必要がある (b) 脱炭材および汚炭材の高温強 度に関するデータ収集が必要がある (特に溶接部について)	2%Cr-1Mo 鋼に対し (1) 湿水素 脱炭シミュレーション試験 (2) Na 中炭素活量と脱炭効果試験 (3) 全周溶接試験片に対する脱炭評価 試験 2%Cr-1Mo 鋼およびステンレス鋼に対し (1) Z 金屋ループにおける各種条件に対する 脱炭および汚炭量の測定と条件の評価 (2) 脱炭材および汚炭材の (a) 高温引張特性試験 (b) クリーフ特性試験 (c) 高温疲労特性試験

9 結 言

高速原型炉の蒸気発生器に関する構造材料および溶接について使用材料の現状および伝熱管の溶接継手と異材継手の現状について調査し問題点を明らかにした。その結果今後必要と考えられる研究課題を提案した。

本調査を通じて感じたことは具体的に要求されるデータの少ないことあるいは殆んどないことで、我国でも厂史の浅い高速炉部門で蒸気発生器の材料、溶接の問題については今後実施すべき研究開発が数多くあるということである。

これ等の研究開発は長い期間を要するものが少なくないためできる限り早期に着手されるのが好ましい。材料および溶接施工の問題点を解決し高速原型炉の蒸気発生器製作技術の確立をはかることは勿論であるが実機の設計に充分利用できるよう非弾性解析の面も考慮したデータの集積が必要と考えられる。

約6ヶ月間、前後8回の検討会を経て現状における問題点は一応洗い出されたので提案した研究開発課題にもとづいて今後関係者がさらに検討して行く場が必要と考えられる。

動燃事業団、溶接協会を含め関係各位に御配慮願いたい。