

区分変更
平成13年7月31日

1064

T
J-225-76-1(5)

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

P5G (溶接材料)



技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	J225 76-0/(5)
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

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)

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、フア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

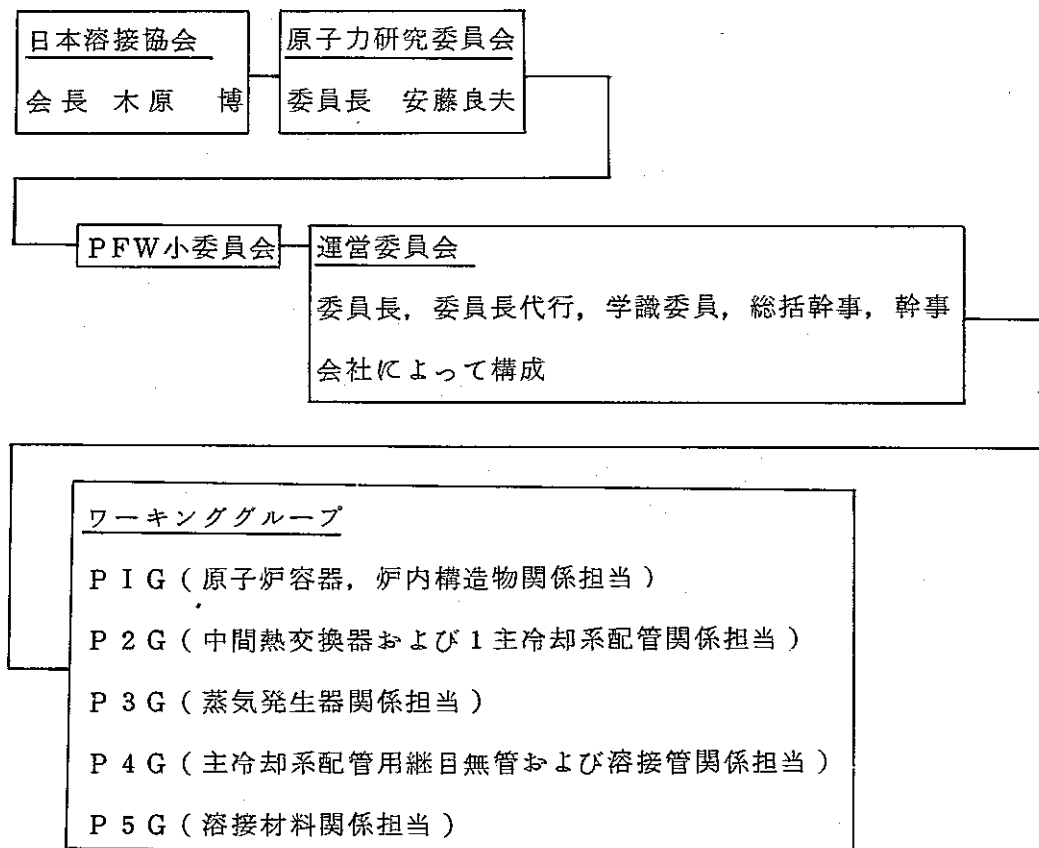
1次主冷却系配管材に溶接管を採用する場合の製造上の問題点、特に溶接継手性能、熱処理、試験および検査などについて、内外のデータを集約し問題点を明らかにした。

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
◇	稻 垣 道 夫	金属材料技術研究所溶接研究部
◇	鵜 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	パブコック日立(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 英 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 英 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 稲 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. 調査対象の概要	1
3. 溶接材料の現状と問題点	2
4. 溶接部の環境効果	18
5. 今後必要な研究開発課題	22
6. 結 言	23

1 緒言

本調査報告は高速原型炉の製作にあたり最も問題となる溶接材料および溶接施工法に関し、我が国の主要溶接材料メーカー、ファブリケーター、および金属材料研究所などの協力を得て国内および海外の現状と問題点を明らかにするため行った調査結果をとりまとめたものである。

調査の主眼は高速原型炉の各コンポーネントが高温のNa中で高い照射の影響を受けるので溶接部の高温特性と環境効果（Na中浸漬の影響と中性子照射効果）の問題であり、これらについて国内および海外の高速炉および類似施設に採用された溶接材料と溶接施工法の現状を可能な限り調査し問題点を明らかにした。

この調査結果に基づいて昭和51年度以降必要な研究開発課題についての提案を行った。

2 調査対象の概要

調査を行った溶接材料は高速原型炉の各コンポーネントに使用される主材料である、304または316ステンレス鋼およびZ $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼に用いる308系または316、16-8-2系オーステナイト系ステンレス鋼溶接材料およびZ $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo系クロムモリブデン鋼溶接材料である。また溶接施工法は対象機器に最も適した方法がとられるのは勿論であるが、要求される溶接部の性能との相関において決定されるべきものである。本調査ではこれらの点に留意し、被覆アーク、サブマージアーク、TIG、MIGなどの各種溶接法とそれぞれの溶接材料との組み合わせにおいて調査した。

表2.1 高速原型炉の設計条件と溶接部において要求される特性について

溶接材料	設計条件			溶接部に要求される特性					
				寿命末期における要求値		未使用状態における基準値および希望値			
	温度	Na純度	照射量	高温衝撃引張特性(一様伸び)	クリープ特性(1次+2次の伸び)	高温引張特性		クリープ破断特性	
破断強度 C.C.15% (基準値)						破断伸び (希望値)	破断強度 C.C.15% (基準値)	破断伸び 10% (希望値)	
308系	550℃	10ppm O ₂	7x10 ²⁰ nvt (炉容器) 3x10 ²¹ nvt (炉内構造物)	10%*	UNIFORM 3% LINEAR 3% LOCAL 6%	550℃で 11kg/mm ²	30%	550℃、10 ¹⁸ で 15kg/mm ²	15%
316系 (16-8-2系を総括)	同上	同上	—	10%*	同上	550℃で 11kg/mm ²	同上	550℃、10 ¹⁸ で 21kg/mm ²	同上
Z $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo系	485℃	同上	—	6%*	同上	485℃で 18kg/mm ²	15%	485℃、10 ¹⁸ で 14kg/mm ²	同上

(※この値は衝撃引張時の母材の一様伸びとして定めたものであり、溶接部については母材より多少低くしても設計において溶接部位置の選定および母材部でのエネルギー吸収効果の向上等の対策を行うことができる。

高速原型炉の設計条件は最もシビアな条件を考慮し、これを基準にして溶接継手に要求される高温特性の基準値および希望値を設定し、これに基づいて溶接材料の問題点の評価を行った。判定は○、△、×で行い、高温特性の基準値または希望値を満足するものについては○印、基準値または希望値と同程度であるものとデータが少なく判定が困難なものについては△印、基準値または希望値を満足しないものについては×印で表わした。*印は設計温度でのデータは少ないが表欄の温度のデータで推測して判断した。なお希望値とはあくまで暫定的なものであり、あくまで溶接材料を開発する上で目安としたものである。

表2.1は高速原型炉の設計条件と溶接部に要求される特性を示したものである。

3 溶接材料の現状と問題点

3.1 308系溶接材料

3.1.1 現状について

308系溶接材料を用いた溶接部の高温特性について調査した結果を表3.1に示す。

表3.1 308系溶接材料の高温特性に関する調査結果^{1)~16)}

設計温度での 基準値 および 希望値	溶接法 区分	高温引張特性				クリープ破断特性				備考
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判 定	破断伸び (%)	判 定	強さ (kg/mm ²)	判 定	破断伸び (%)	判 定	
		基準値 11 kg/mm ²		希望値 30%		基準値 10 ⁴ R ₂ 15 kg/mm ²		希望値 10 ⁴ R ₂ 15%		
被覆	国内	データなし	○ ^{*700}	21~37	○	3×10 ³ R ₂ 22	○	3×10 ³ R ₂ 16	△	設計温度付近のデータ少
	海外	21~32	○	17~30	×	20~28	○	10~35	△	CRE 308 ^{注1)} のデータが中心
TIG	国内	28	○	データなし	○ ^{*600}	データなし	△	データなし	△	設計温度付近のデータ少
	海外	30~40	○	10~18	△	データなし	△	データなし	△	
MIG	国内	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	設計温度付近のデータ少
	海外	25~35	○	13~25	×	データなし	△	データなし	△	
サブマージ アーク	国内	17~27	○	31~39	○	3×10 ³ R ₂ 21	○	3×10 ³ R ₂ 17	△	改良型308 ^{注2)} のデータが中心
	海外	17~32	○	20~26	○	3×10 ³ R ₂ 19	○	データなし	△	

(1) 高温引張特性

図3.1に国内標準型308および改良型308^{注1)}(以下308系と略称)溶接部の高温引張における0.2%耐力を基準値およびCRE-308^{注2)}被覆アーク溶接部の0.2%耐力と比較して示した。国内データは、CRE-308と比較すると若干低目であるが、いずれの溶接法においても基準値を満足しており問題ないと考えられる。

(注1) controlled residual elements 308。米国のFFTF用に開発されたクリープ特性の優れた被覆アーク溶接棒。Ti, PおよびBを微量添加している。

(注2) Nb, V等を微量添加してクリープ破断特性を改善したもの。

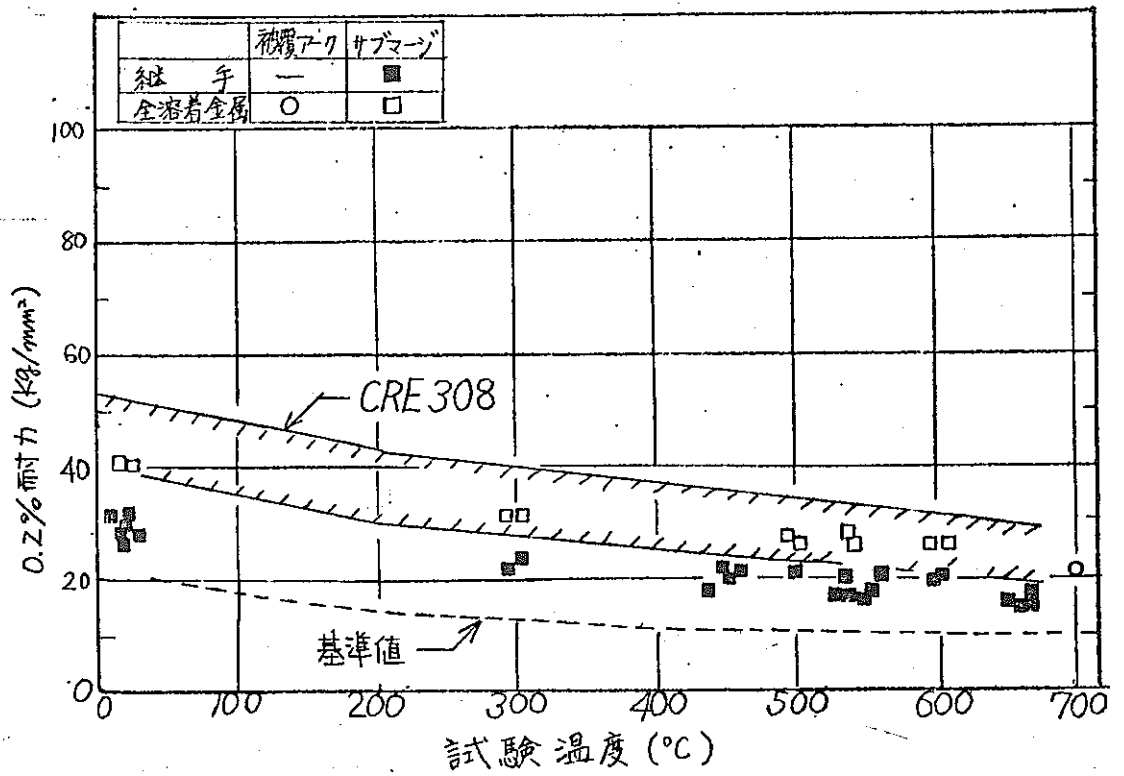


図 3.1 308系溶接部の試験温度と0.2%耐力との関係

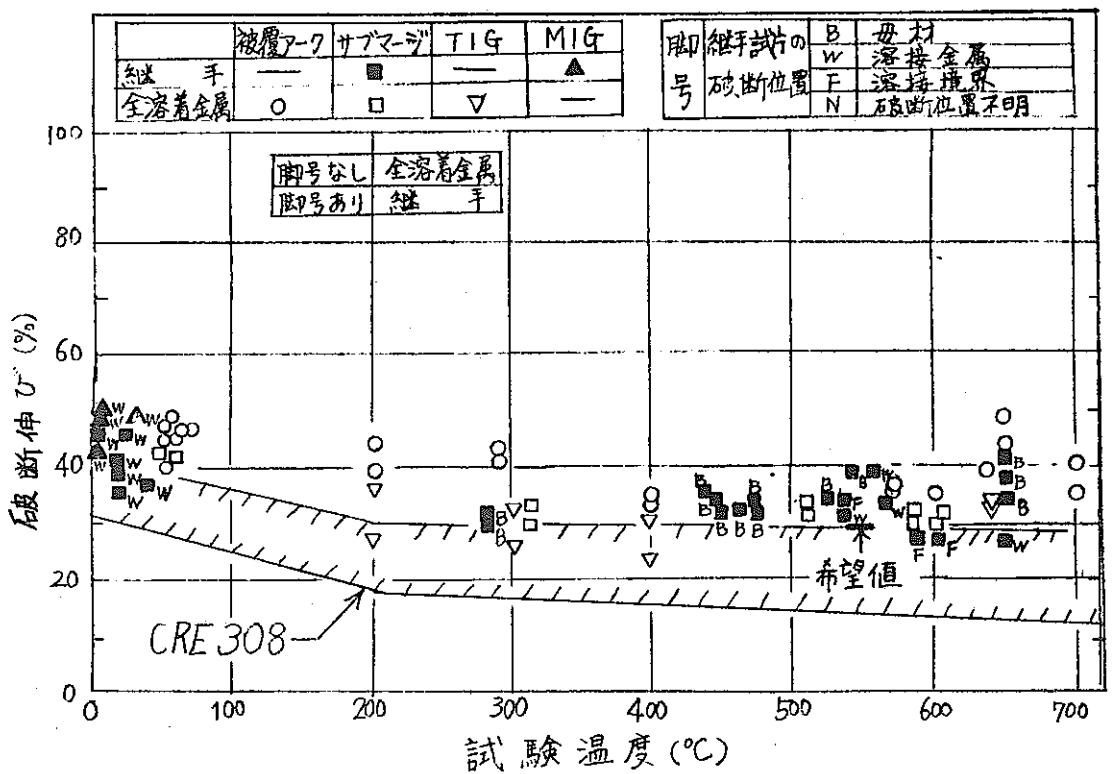


図 3.2 308系溶接部の試験温度と高温引張破断伸びとの関係

図3.2に溶接部の高温引張における破断伸びを希望値およびCRE308被覆アーケ溶接部の高温引張破断伸びと比較して示した。国内データはCRE308と比較するとかなり高水準にあるが、一部希望値を満足していないものがあり、希望値を保証するためには何らかの改善対策が必要である。

(2) クリープ破断特性

図3.3に溶接部のクリープ破断強さを基準値およびCRE308被覆アーケ溶接部のクリープ破断強さと比較して示した。国内データには308および改良型308のデータが含まれる。国内溶接材料はCRE-308と比較すると若干低いクリープ破断強さを示すようであるが基準値を満足しており、問題は無いと考えられる。なおここでは溶接法がサブマージアーケ溶接と被覆アーケ溶接に限定されており、しかも設計温度でのデータ数が少ない。今後設計温度のデータを更に蓄積すると共に、他の溶接法についてもデータを整備する必要があると考えられる。図3.4に国内308系溶接部のクリープ破断伸びを、希望値およびCRE-308被覆アーケ溶接部のクリープ破断伸びと比較して示した。国内溶接材料は、CRE-308と比較して低い破断伸びを示し、しかも希望値を満足するものもほとんどないことが明らかであり、今後開発研究が必要である。なお、600℃において高い破断伸びを示しているのは改良型308であるが、この溶接材料の550℃のデータがないので希望値を満足するかどうかは不明であり、今後550℃における確性試験が必要である。

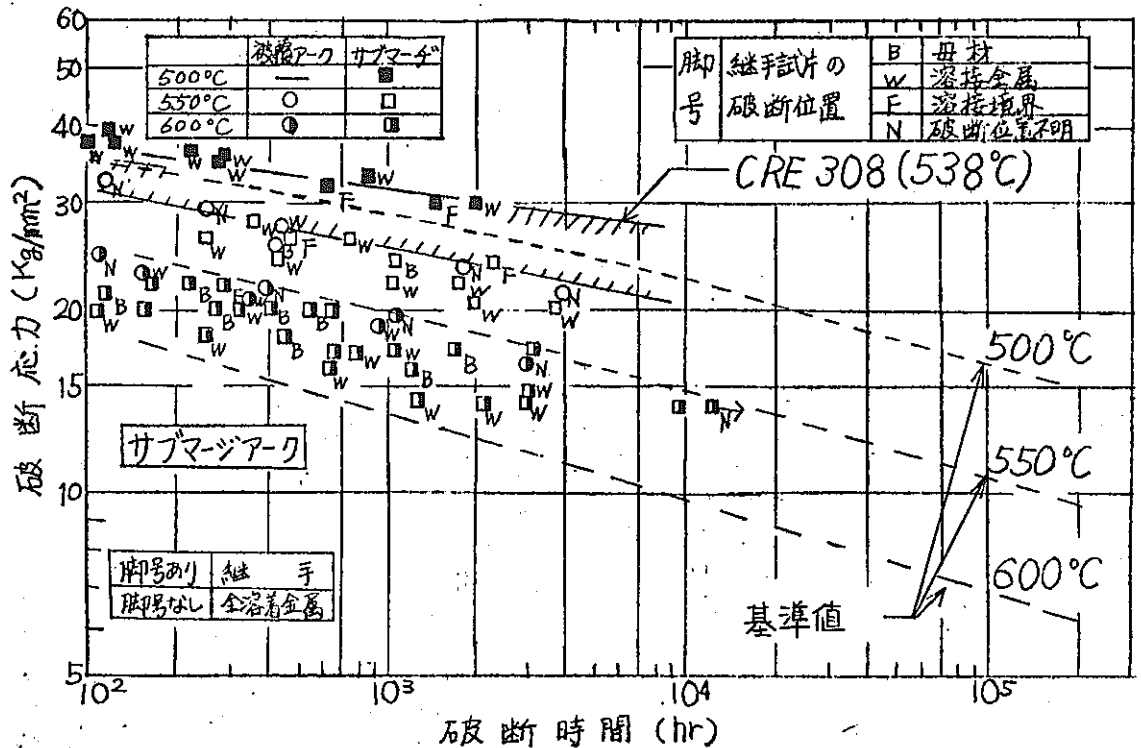


図3.3 国内標準型308および改良型308溶接部の試験温度とクリープ破断強さとの関係

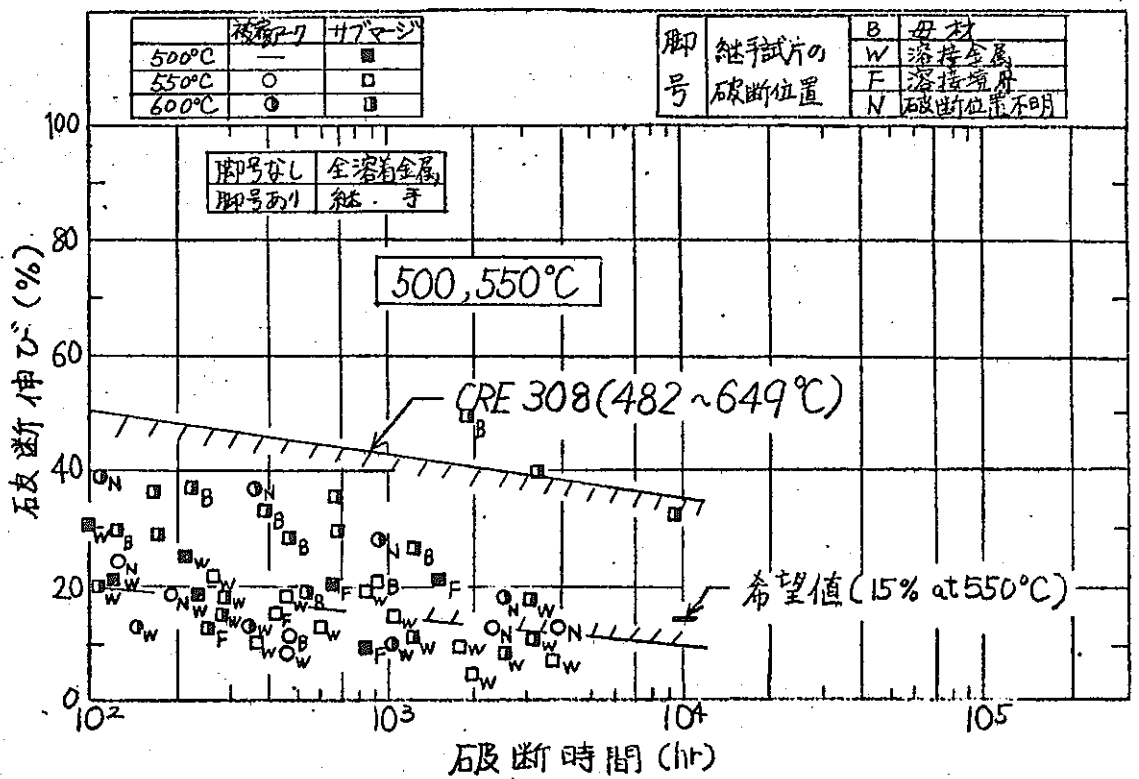


図3.4 国内標準型308および改良型308 溶接部の試験温度と70°C破断伸びとの関係

(3) クリープ特性

調査の範囲では、溶接部のクリープ曲線を求めた国内データは皆無であった。海外では幾つかの報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾があり、その一例を図3.5に示した。これによれば母材と溶接部では本質的にクリープ挙動に差異があることおよび溶接部においては試験片の採取方向と採取位置(表面からの深さ)によってクリープ挙動が著しく異なることがわかる。このようなデータは設計上極めて有用であり、国内溶接材料についてもこのような溶接部に関する詳細なデータを整備する必要があると考えられる。

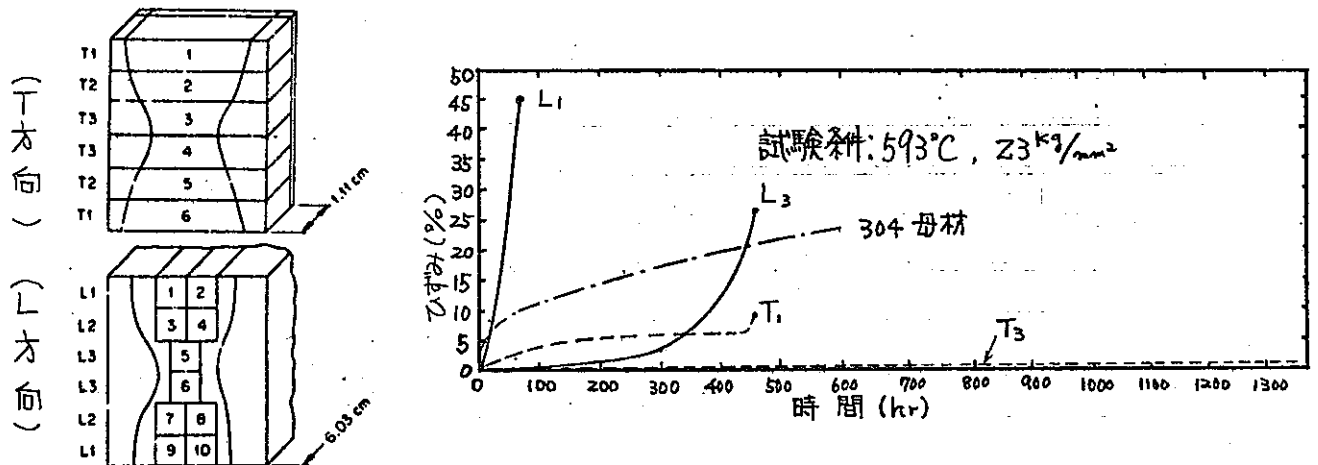


図3.5 CRE-308被覆アーク 溶接部のL方向およびT方向試験片のクリープ曲線

(4) 溶接部の高温特性に影響を及ぼす諸要因

溶接部の高温特性に影響を与えるものとしては非常に多くの要因が挙げられるが、それらの主なものにより調査の範囲をまとめた。

(a) デルタフェライト量

デルタフェライトは溶接部の高温割れを抑制する作用があるので、ほとんどのステンレス溶接材料はこれを積極的に利用する観点から合金設計なされているが、デルタフェライト量が多すぎると、後熱処理中あるいは使用期間中に σ 相に変態するか、あるいは 475°C 脆性を示し材料を脆化させ^{(7),(9)}クリープ破断伸びも低下させる⁽⁸⁾ので適正な範囲に制限する必要がある。

(b) 後熱処理

溶接施工後に行われる後熱処理は、その目的に応じ処理温度が異なり、比較的低温($\sim 550^{\circ}\text{C}$)で行われる寸法安定化処理、中程度の温度($800\sim 900^{\circ}\text{C}$)で行われる応力除去焼鈍、耐食性回復のために高温(1000°C 以上)で行われる固溶化熱処理の3種に大別される。ここでは溶接部の高温特性に及ぼす各種熱処理の影響と実際の使用中の高温特性の変化を究明するために行われた長時間時効試験の結果をまとめて表3.2に示した。

表3.2 308系溶接部の高温特性に及ぼす後熱処理の影響

特 性	寸法安定化熱処理	応力除去焼鈍	固溶化熱処理	長時間時効
	550°C $\times 1 \sim 10 \text{ hr}$	870°C $\times 1 \sim 10 \text{ hr}$	$\sim 1050^{\circ}\text{C}$ $\times 1 \sim 1.0 \text{ hr}$	$650^{\circ}\text{C} \times$ $5 \times 10^3 \text{ hr (最大)}$
クリープ破断強さ		高温長時間で若干低下 ⁽¹⁾		若干向上 ⁽⁷⁾
クリープ破断伸び		若干向上 ⁽¹⁰⁾		一旦低下後若干向上 ⁽⁷⁾
高温引張降伏強さ	ほとんど影響なし ^{(7),(9)}	若干低下 ^{(7),(9)}	ほぼ母材の水準まで低下 ^{(7),(9)}	向上 ⁽⁷⁾ 低下 ⁽¹⁰⁾
高温引張破断伸び	ほとんど影響なし ^{(7),(9)}	若干低下 ^{(7),(9)}	向上 ^{(7),(9)}	低下 ⁽⁷⁾ , 一旦低下後向上 ⁽¹⁰⁾
高温衝撃吸収エネルギー	ほとんど影響なし ⁽⁹⁾	ほとんど影響なし ⁽⁹⁾	ほとんど影響ないが、若干向上 ⁽⁷⁾	デルタフェライトが多いもの低下大 ⁽¹⁰⁾

(c) 微量元素

高温特性、特にクリープ特性は通常不純物として含まれる微量元素によつて大きく影響されることがある。表3.3に308系溶接部の高温特性に及ぼす微量元素の影響をまとめて示した。

表3.3 308系溶接部の高温特性に及ぼす微量元素の影響

元素	元素の変動範囲 (wt%)	溶接手法	高温特性に及ぼす影響	引用文献
C	0.035~0.074		クリープ破断強さを上げる。破断伸びには害なし。	(4)
	0.006~0.064		長時同時効による脆化を促進する。	(10)
Si	0.29~0.73	被覆	クリープ破断強さを若干上げ、破断伸びを低下させる。	
P	0.012~0.035	アーク	クリープ破断強さ、破断伸びを向上させる。	(4)
S	0.006~0.027		クリープ破断特性に影響なし。	
B	0.001~0.006		クリープ破断強さ、破断伸びを著しく向上させる。	
N	0.053~0.29	MIG	クリープ破断特性に影響なし。	(12)

(d) 溶接入熱量

サブマージ溶接部のクリープ破断特性に及ぼす溶接入熱量の影響を図3.6に示した。過剰の溶接入熱はクリープ破断強さを著しく低下させるが破断伸びに対する影響は認められない。なお図中のデータはいずれも550℃のデータであり、数字は破断伸びを示している。

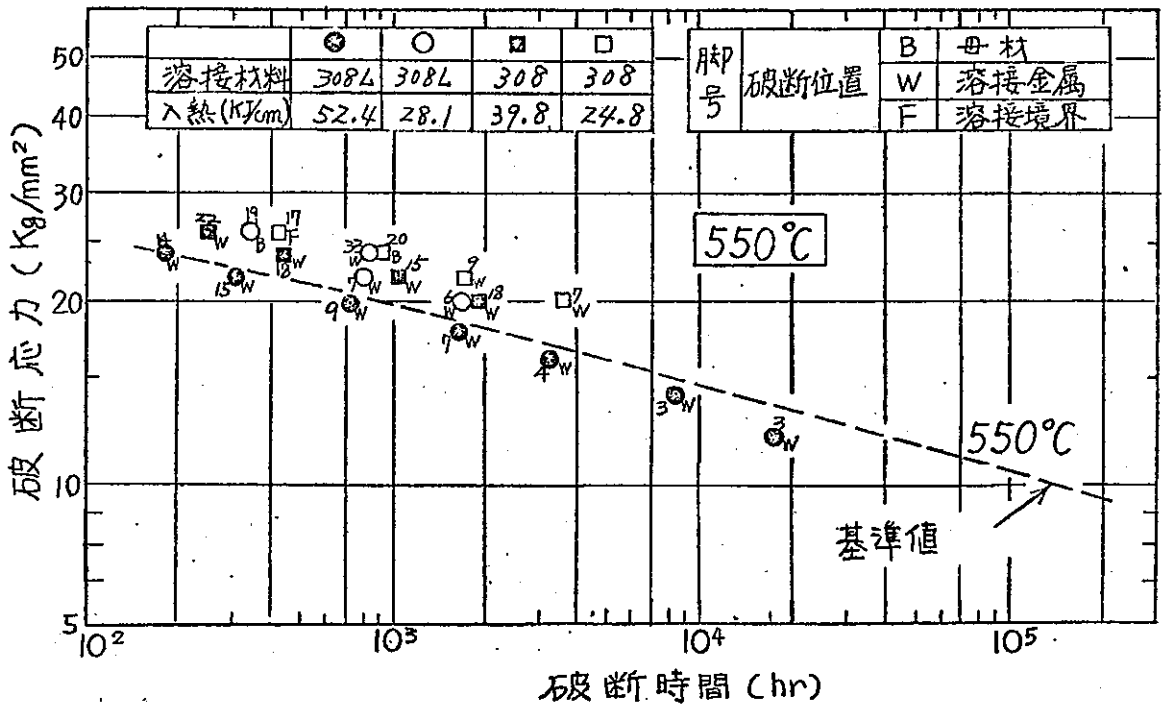


図3.6 308系サブマージ溶接部のクリープ破断特性に及ぼす溶接入熱量の影響⁽²⁾

3.1.2 問題点について

高速原型炉用の観点から現在の国内308系溶接材料の持つ問題点を抽出すると以下のようになる。

(1) 溶接部の高温延性の不足

現在の国内溶接材料による溶接部は高温延性、特にクリープ破断伸びが低く改善を要する。

(2) 高温特性データの不足

高速原型炉の溶接施工には、構造部に応じて各種の溶接法が適用される可能性がある。しかし現状では溶接部の高温特性の観点から各種溶接法の評価を行うに充分なデータはな。また溶接部のクリープ曲線を求めたクリープデータは国内にはなかった。クリープデータは設計の立場から不可欠のものであり今後試験を行う必要がある。

(3) 伸び評価の問題

溶接部の形状および試験片寸法などの差異により破断伸びの評価が異なる。

(引用文献)

- 1) P5G-Ra-11
- 2) 「高速実験炉構造材料のクリープ試験に関する研究」N241-72-44(昭47-12)
- 3) P5G-Ra-8
- 4) P5G-Ra-9
- 5) ORNL TM 4026
- 6) ORNL TM 4131
- 7) HEDL TME 74-25
- 8) P5G-Ra-7
- 9) 「高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究」(I) (昭46-8)
- 10) 「高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究」(II) (昭47-8)
- 11) P5G-Ra-20
- 12) P5G-Ra-4
- 13) P5G-Da-1
- 14) P5G-T-9
- 15) P5G-T-5
- 16) P5G-Da-16

3.2 316系と16-8-2系溶接材料

3.2.1 現状について

316系と16-8-2系溶接材料を用いた溶接部の高温特性について調査した結果を表3.4に示す。

表3.4 316系および16-8-2系溶接材料の高温特性に関する調査結果

溶接法	設計温度での 基準値 および 終値	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	判 定	破断伸び (%)	判 定	強さ (kg/mm ²)	判 定	破断伸び (%)	判 定		
											基準値 11kg/mm ²
316系	被覆 アーク	国内	27~29	○	26~29	△	データなし	○ ^{*600}	データなし	△	クリープデータ特になし
		海外	データなし	○ ^{*593}	データなし	△	データなし	○ ^{*593}	データなし	△	
	TIG	国内	データなし	○ ^{*600}	30	△	データなし	○ ^{*600}	データなし	△	クリープデータ特になし
		海外	36	○	データなし	△	2.5×10 ⁴ R _T - 28	○	データなし	△	
	MIG	国内	データなし	△	25~40	△	データなし	○ ^{*600}	データなし	△	クリープデータ特になし
		海外	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
サブマージ アーク	国内	データなし	△	30	△	データなし	○ ^{*600}	データなし	△	クリープデータ特になし	
	海外	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△		
16-8-2系	被覆 アーク	国内	データなし	○ ^{*600}	データなし	△	データなし	△	データなし	△	設計温度でのクリープデータなし
		海外	データなし	○ ^{*593}	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
	TIG	国内	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	全体にデータが少な
		海外	データなし	○ ^{*593}	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
	MIG	国内	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	全体にデータが少な
		海外	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
サブマージ アーク	国内	データなし	△	データなし	△	3.0×10 ⁴ R _T - 22	△	データなし	△	引張のデータ特になし	
	海外	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△		

(1) 316系溶接材料

316系溶接材料の溶接部の高温引張特性を図3.7¹⁷⁻²⁸⁾と図3.8¹⁷⁻²⁸⁾に示す。高温における0.2%耐力測定の実データは非常に少ない。少ないデータではあるが316系溶接材料は基準値を満足するこゝが期待できる。しかし破断伸びに関してはデータのバラツキも大きく、また測定方法の違いなどもあり現状の316系では希望値を一部下まわるものもあり改善が必要である。

クリープ破断強さは図3.9¹⁷⁻²⁸⁾に示す。316系溶接材料のクリープ破断強さはサブマージアーク溶接、TIGおよびMIG溶接において基準値をほぼ満足する。被覆アーク溶接はデータが少

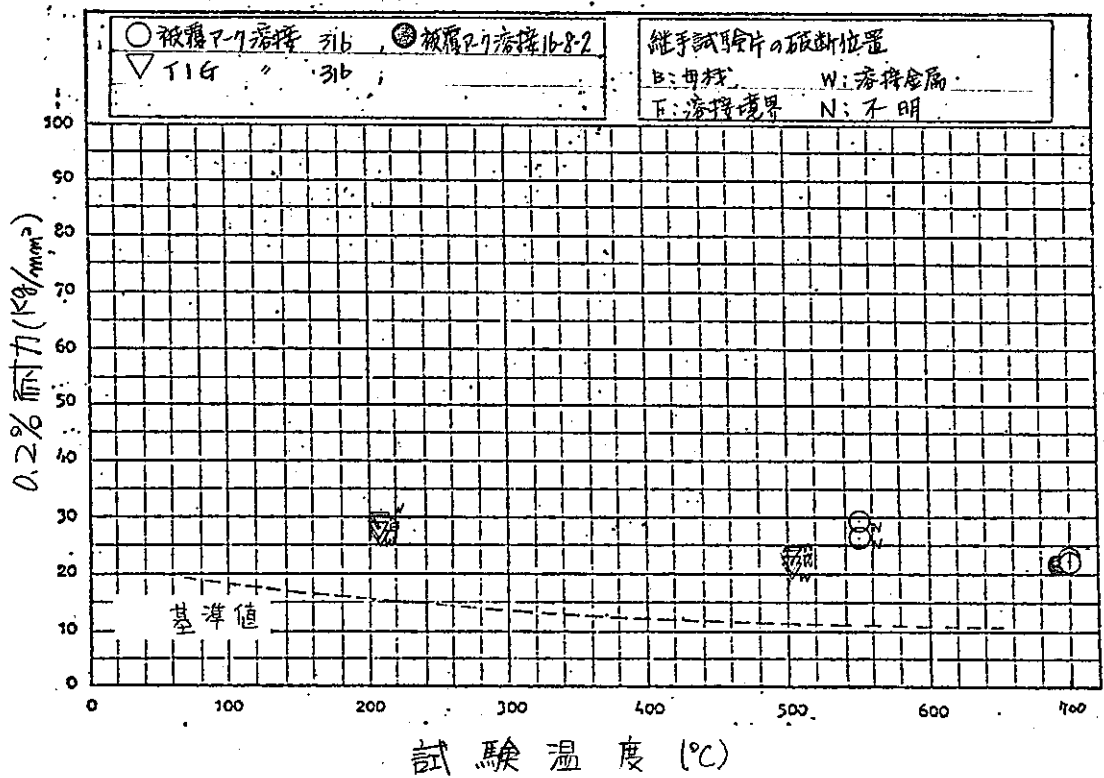


図3.7 316系および16-8-2系溶接部の試験温度と0.2%耐力との関係

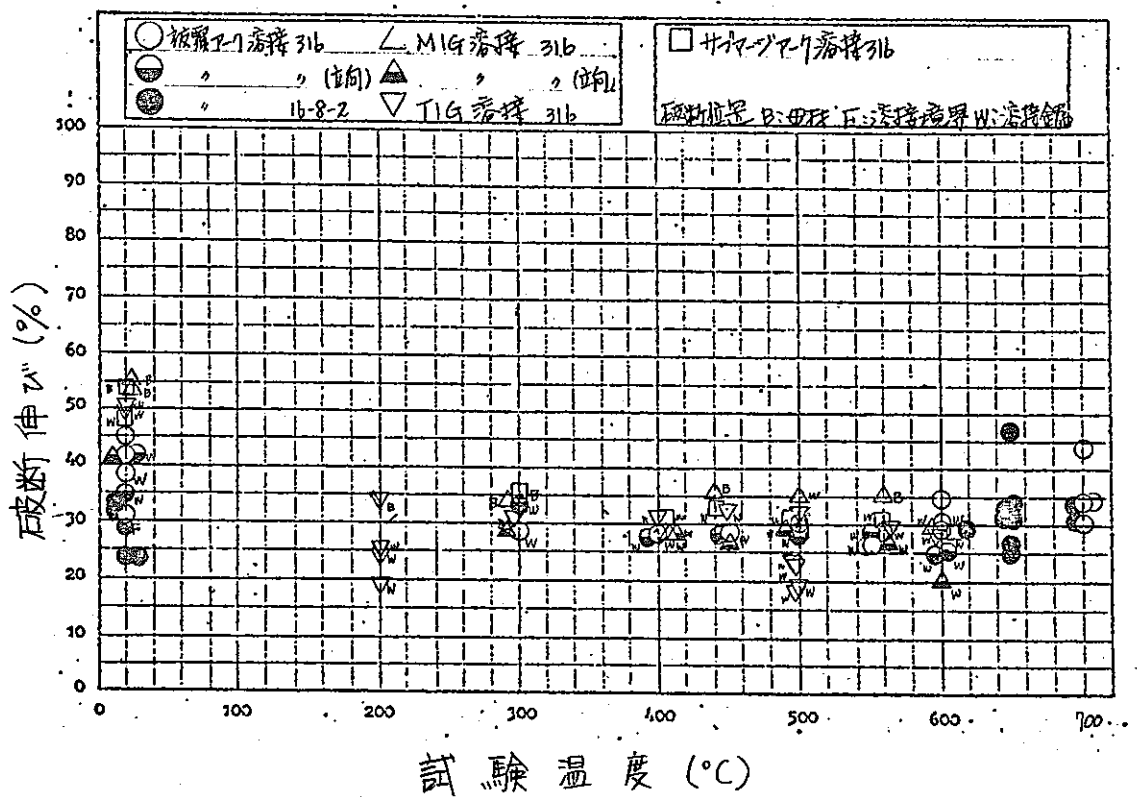


図3.8 316系および16-8-2系溶接部の試験温度と高温引張破断伸びとの関係

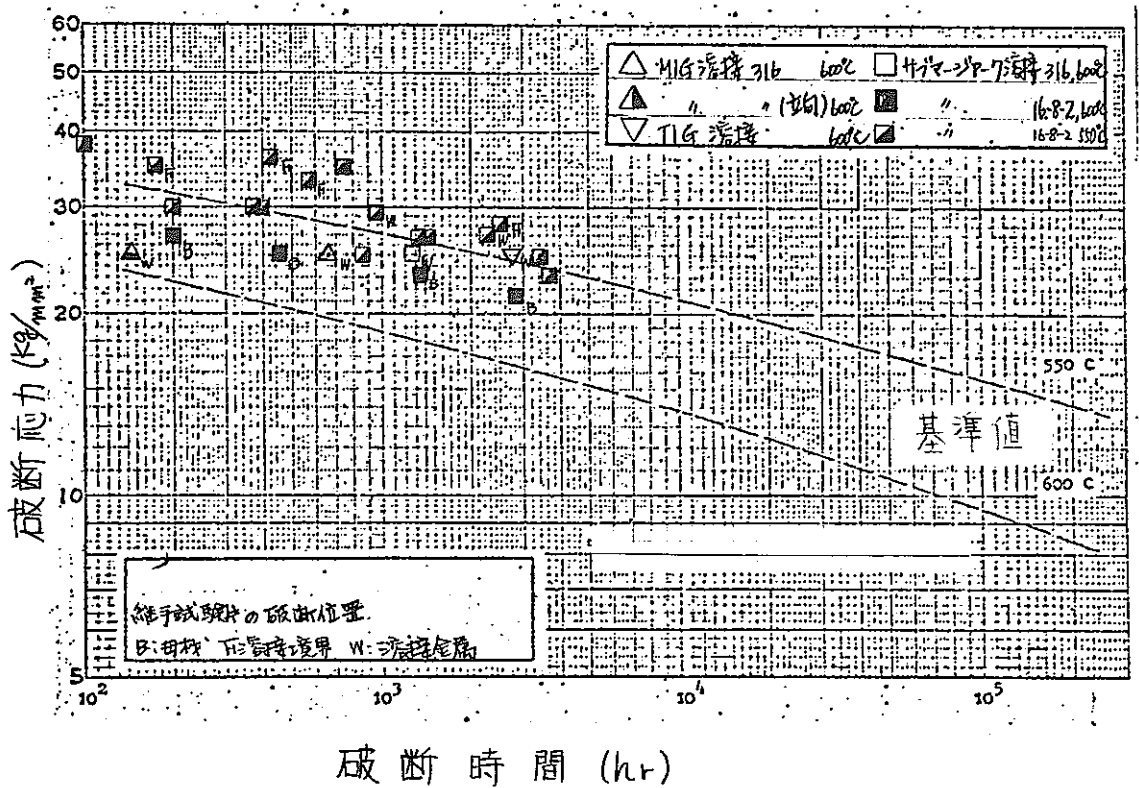


図3.9 316系および16-8-2系溶接部の試験温度とクリープ破断強さとの関係

11が、高温(650~700℃)のデータから推測して基準値を満足すると考えられる。しかしクリープ破断強さに関するデータ、また長時間試験のデータもないので 10^4 時間以上になった場合のクリープ破断の挙動については明らかでない。クリープ破断伸びに関しては550~600℃のデータがなく今後の温度領域での試験が必要である。

(2) 16-8-2系溶接材料

16-8-2系溶接材料の溶接部の高温引張特性を316系と同じ図3.7と図3.8に示す。高温における0.2%耐力の測定データはほとんどなく、破断伸びに関するデータも少ない。16-8-2系溶接材料の0.2%耐力と破断伸びに関してはデータが少なすぎ判断できない。

クリープ破断強さは図3.9に示す。550~600℃のデータはサブマージ溶接がほとんどである。被覆アーク溶接のデータは650~700℃のものが多かった。クリープ破断強さはサブマージ溶接においては基準値をほぼ満足しており、被覆アーク溶接については高温側のデータから推測して基準値を満足するものと考えられる。

クリープ破断伸びに関してはほとんどデータがないので今後の検討が必要である。

(3) 316系と16-8-2系溶接材料の比較

316系および16-8-2系溶接材料のクリープ破断強さをLARSON-MILLERパラメータで整理し比較したものを図3.10に示す。図中には国内の316系および16-8-2系溶接材料の550~700℃のクリープ破断強さを大きなマークで示している。これよりクリープ破断強さは316系、16-8-2系溶接材料とも基準値よりも上にあり、クリープ破断強さに関しては十分満足した値を持っている。また316系と16-8-2系溶接材料のクリープ破断強さの差はほとんどなるとみられる。クリープ破断伸びに関しては650℃、700℃のデータも含めて比較すると、316系溶接材料の方がいくぶん破断伸びがある様である。しかし溶接割れ防止や高温長時間の使用による材質変化の影響などを考えると16-8-2系の方が期待できると思われる。

また海外のクリープ破断強さのデータを小さいマークでプロットし316系および16-8-2系溶接材料の国内データと比較した。海外データの316系溶接材料は低応力の場合と長時間試験の場合基準値の下となっており、特に10⁴時間以上のクリープ破断強さは低いとされている。

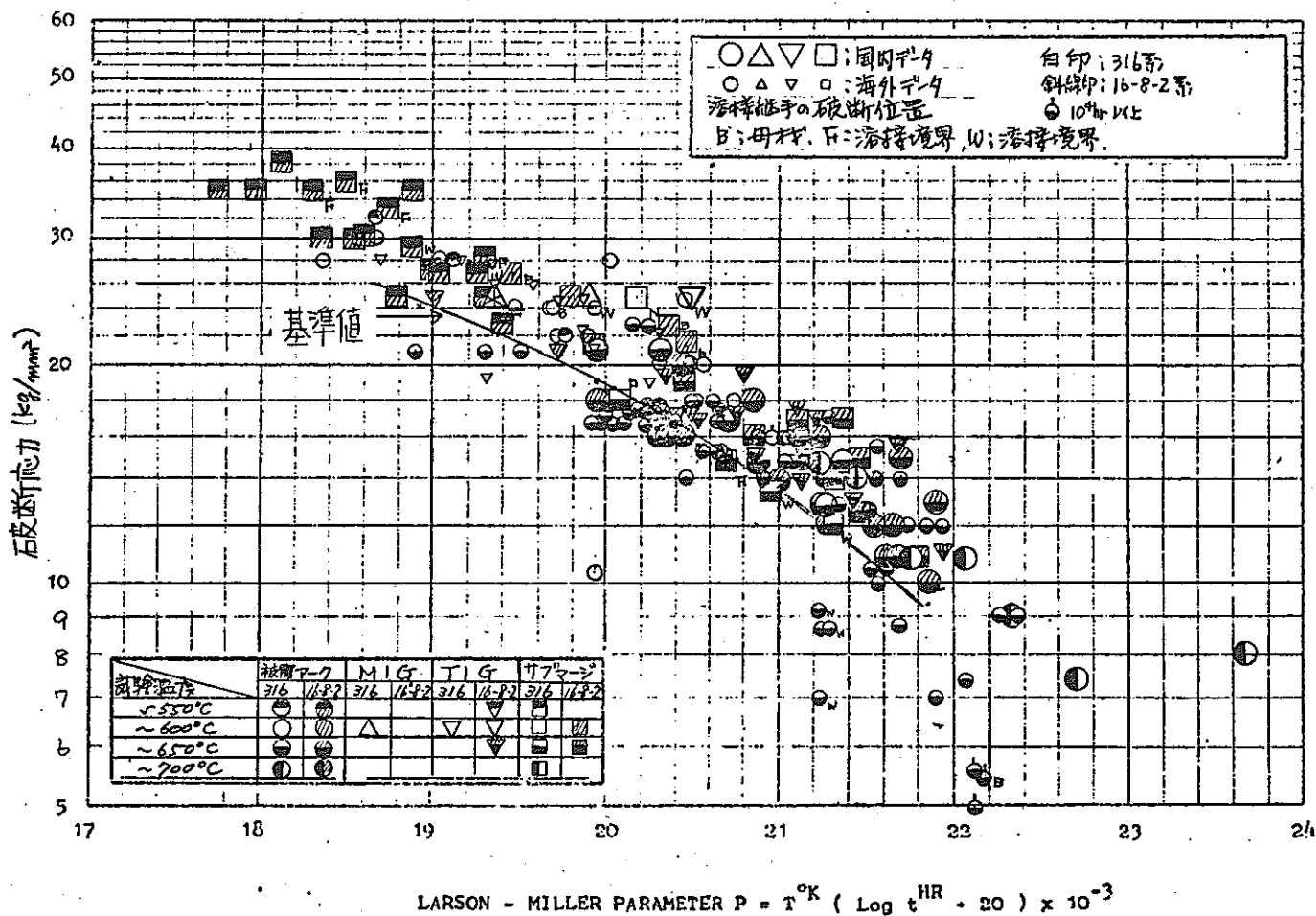


図3.10 国内および海外の316系、16-8-2系溶接材料のクリープ破断強さの比較

3. 2. 2 問題点について

316系および16-8-2系溶接材料の高温強さと伸びに関する調査の結果次の問題があげられる。

(1) 高温特性データの不足

国内溶接材料の高温強さ(高温引張試験の0.2%耐力とクリープ破断強さ)と破断伸びに関するデータが非常に不足しており基準値と希望値との比較ができない。また、高温強さと伸びに関する現時点のデータは試験最長時間で 5×10^3 時間程度であり、さらに長時間側の材質挙動については不明である。

(2) 溶接部の高温延性の問題

316系と16-8-2系溶接材料の破断伸び(特にクリープ破断伸び)が少なく、はっきりしたことは不明であるが 600°C での試験データでは $2 \sim 3 \times 10^3$ hで破断伸びが10%以下になっている。また高温長時間側での脆化についても検討が必要。

(3) 伸び評価の問題

溶接部形状および試験片寸法などの差異により破断伸びの評価が異なる。

(引用文献)

- 17) P5G-T-9 (株)新日本製鉄社内データ
- 18) (株)神戸製鋼所社内データ
- 19) (株)日立製作所社内データ
- 20) (株)川崎重工業社内データ
- 21) (株)日本ウエルディングロッド社内データ
- 22) (株)石川島播磨重工業社内データ
- 23) 高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究 (II)
- 24) ORNL-4781
- 25) Soud. Tech. Connexs Mai-Apr 1973, 27 (3~4)
- 26) HEDL TME 74-25
- 27) Nuclear Technology vol 24 No 74
- 28) ASME PAPER 75-PVP-45

3.3 2/4Cr-1Mo系溶接材料

3.3.1 現状について

2/4Cr-1Mo系溶接材料を用いた溶接部の高温特性について調査した結果を表3.5に示す。

表3.5 2/4Cr-1Mo系溶接材料の高温特性に関する調査結果^{29~35)}

設計温度での 基準値 および 種類	高温引張特性				クリープ破断特性				備考	
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	判 定	破断伸び (%)	判 定	強さ (kg/mm ²)	判 定	破断伸び (%)	判 定		
	基準値 18kg/mm ²		希望値 15%		基準値 10 ⁴ R ² 14kg/mm ²		希望値 10 ⁴ R ² 15%			
溶接法 区分										
被覆 アーク	国内	40	○	16~18	○	7.8×10 ³ R ² 18	○	2.8×10 ³ R ² 30	○	SRは680℃×10 ³ h
	海外	データなし	○ ^{*550}	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
TIG	国内	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	設計温度でのデータはない
	海外	データなし	△	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
MIG	国内	データなし	○ ^{*550}	データなし	○	データなし	○ ^{*550}	データなし	△	設計温度でのデータはない
	海外	データなし	○ ^{*550}	データなし	△	データなし	△	データなし	△	
サブマージ アーク	国内	27~36	○	20~30	○	2.1×10 ³ R ² 21	○	2.1×10 ³ R ² 35	○	SRは680℃×3h
	海外	データなし	○ ^{*550}	データなし	△	データなし	△	データなし	△	

(1) 高温引張特性について^{29~35)}

図3.11は2/4Cr-1Mo系溶接部の高温引張試験データについて0.2%耐力と試験温度の関係を示す。図からわかるように溶接後熱処理条件にかかわらず各溶接部の0.2%耐力は基準値を満足している。図3.12は同じく破断伸びと試験温度の関係を示す。破断伸びについても希望値をほぼ満足している。

(2) クリープ破断特性について^{29~35)}

図3.13はクリープ破断強さと破断時間の関係を示し、図3.14はクリープ破断伸びと破断時間の関係を示す。データはいずれも全溶接金属試験片である。

破断強さは溶接後熱処理条件にかかわらず、いずれの溶接法の場合も基準値を満足しているが長時間側での試験結果が乏しいので今後の試験が必要である。破断伸びは長時間側で寄与度バラツキが大きく、これは後熱処理条件が異なるデータが混在しているためと考えられる。後熱処理温度が低くかつ短時間側の場合には希望値の伸びに達しないものもあるので最適後熱処理条件の選定が必要である。

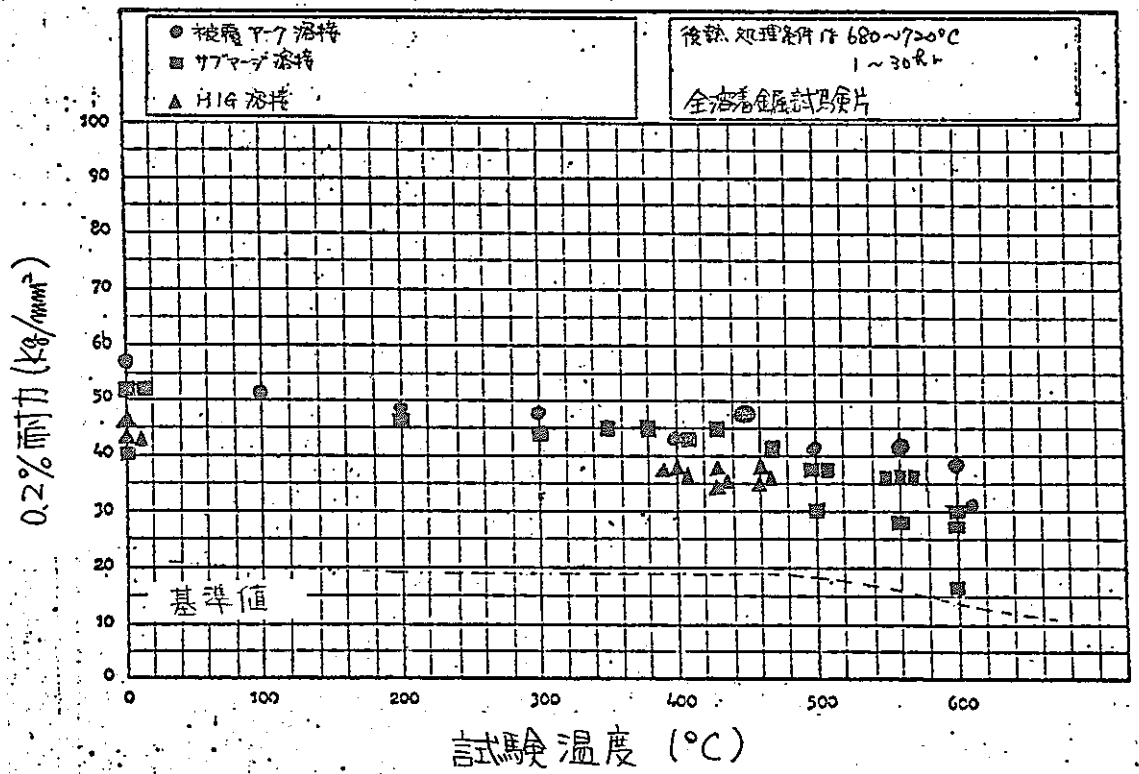


図3.11 Z $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo系溶接部の試験温度と0.2%耐力との関係

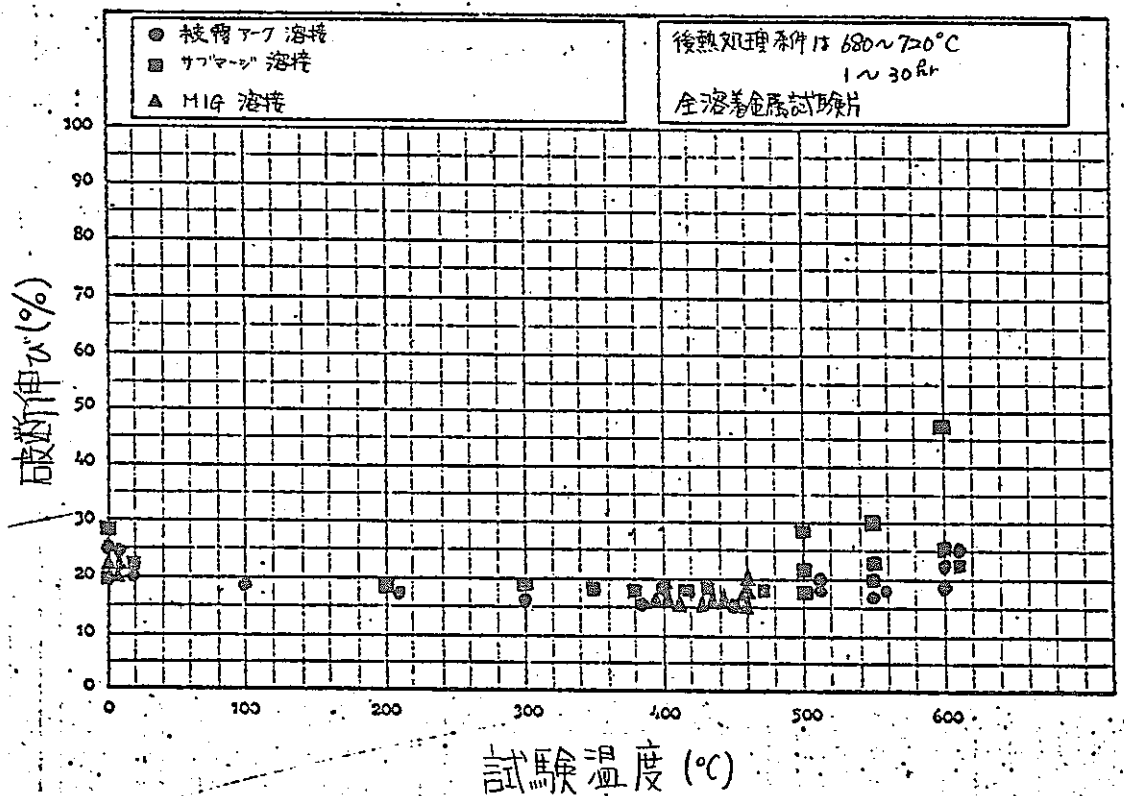


図3.12 Z $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo系溶接部の試験温度と高温引張破断伸びとの関係

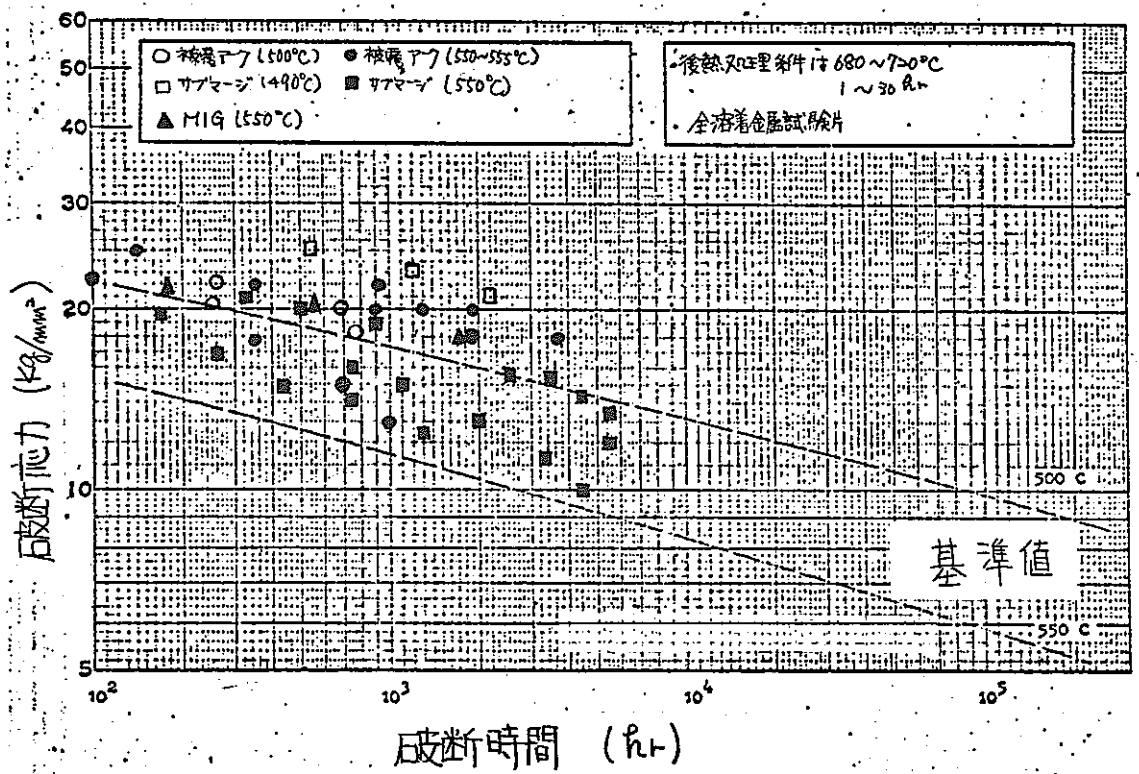


図3.13 2 1/4Cr-1Mo系溶接部の試験温度と71-7°破断強さとの関係

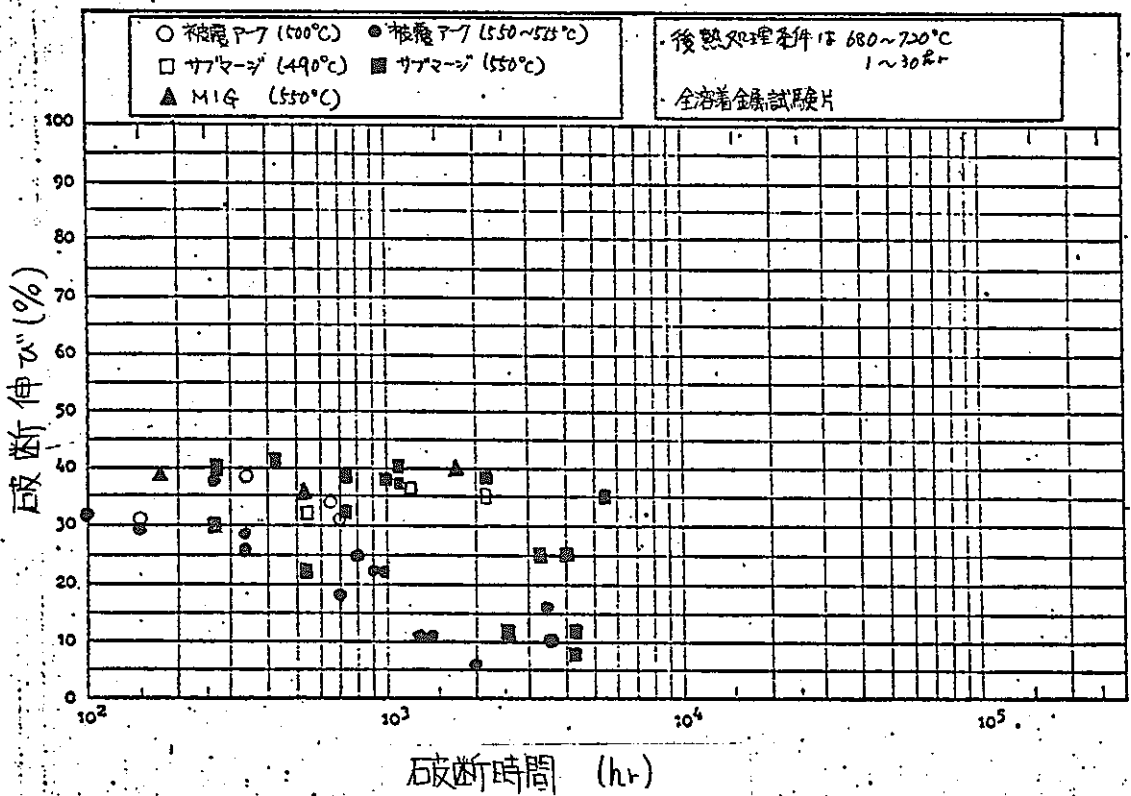


図3.14 2 1/4Cr-1Mo系溶接部の試験温度と71-7°破断伸びとの関係

3.3.2 問題点について

現状の国内2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo系溶接材料の問題点としては次のようなことがあげられる。

(1) 高温特性データの不足

溶接部の高温特性を基準値および希望値と比較する上でのデータが乏しい。特にクリープ破断データの長時間側が不足しているため試験が必要である。

(2) 溶接部の高温延性

溶接部の高温延性を検討する上でのクリープデータ(クリープ曲線をとったもの)が少なく、今後試験を行う必要がある。

(3) 伸び評価の問題

溶接部形状および試験片寸法などの差異により、破断伸びの評価が異なる。

(引用文献)

29) (株)新日本製鉄社内データ

30) (株)神戸製鋼所社内データ

31) (株)三菱重工社内データ

32) "The elevated-temperature properties of weld-deposited metal and weldments"
ASTM special Technical Publication No 226

33) P 5 G - T - 9

34) P 5 G - Da - 3

35) P 5 G - T - 13

4 溶接部の環境効果

溶接部に対する環境効果としてはNa効果と中性子照射効果がある。溶接部のNa効果については調査を行ったが現時点では適切なデータが得られなかったため本章では照射効果についてのみ述べる。

照射効果の国内データは現時点ではほとんど得られないので米国における308系溶接部に関するものを収集した。

高速原型炉の原子炉容器および炉内構造物の設計温度および寿命末期における照射量は表2-1に示すこととであるが、この条件に適合するデータがないので照射温度および照射量の近いデータを検討した。

4.1 高温引張特性に対する照射効果³⁶⁾

10^{21} n/cm² 程度の照射を受けた全溶着金属および継手の0.2%耐力を図4.1に示す。図中には未照射全溶着金属に関するデータのバラツキ範囲(溶接条件は照射材と同じもの)を斜線線で示している。図からTIG溶接および被覆アーク溶接の一部が未照射材に比べて伸びがなくなつてきているようであるが、全体的には照射の影響はほとんどないと思われる。また破断伸びは照射脆化により低下するところが予想されるが、 10^{21} n/cm² 程度の照射量では0.2%耐力の場合と同様にはほとんど影響はないものと思われる。図4.2において溶接継手の伸びが全溶着金属に比べて低くなつてきているが、これは試験片の標点間距離のとり方により影響を受けるので全溶着金属の値と直接比較できず、必ずしも照射効果が入ることを示すものではない。

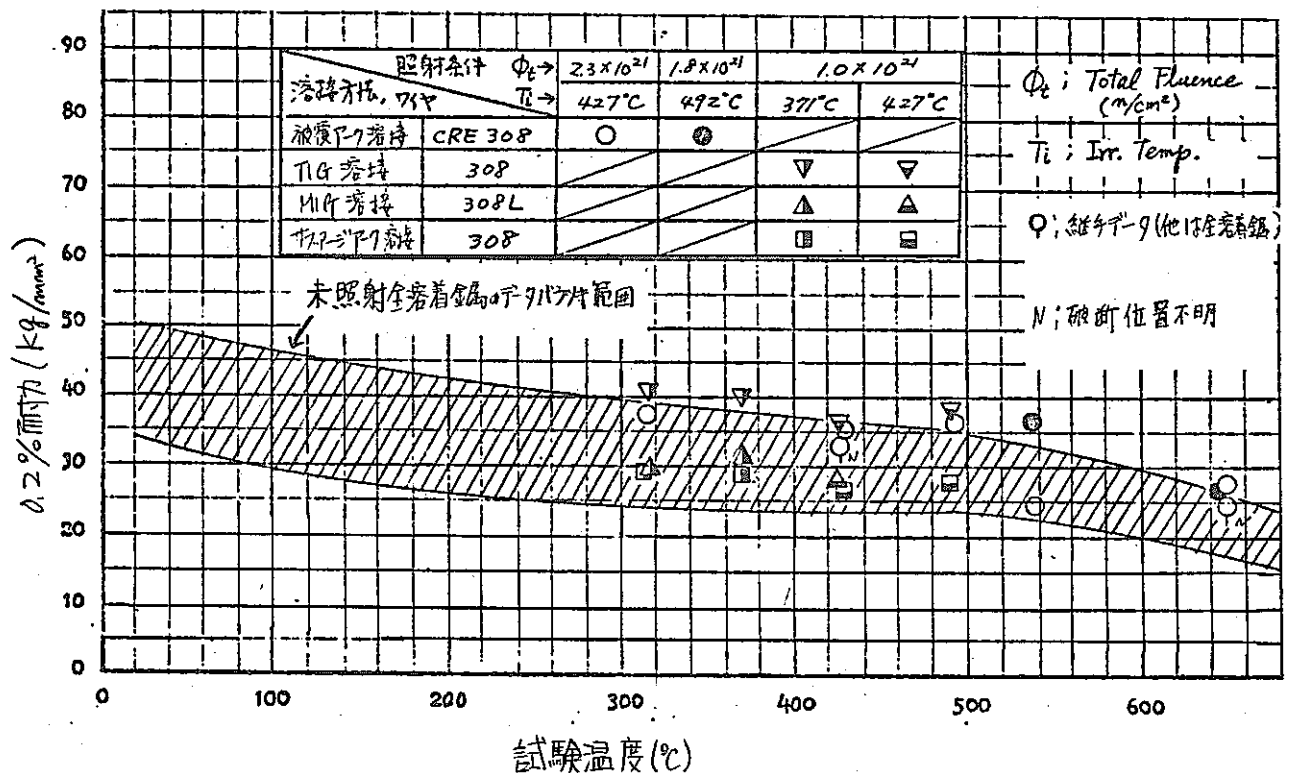


図4.1 308系溶接部の0.2%耐力におよぼす照射の影響

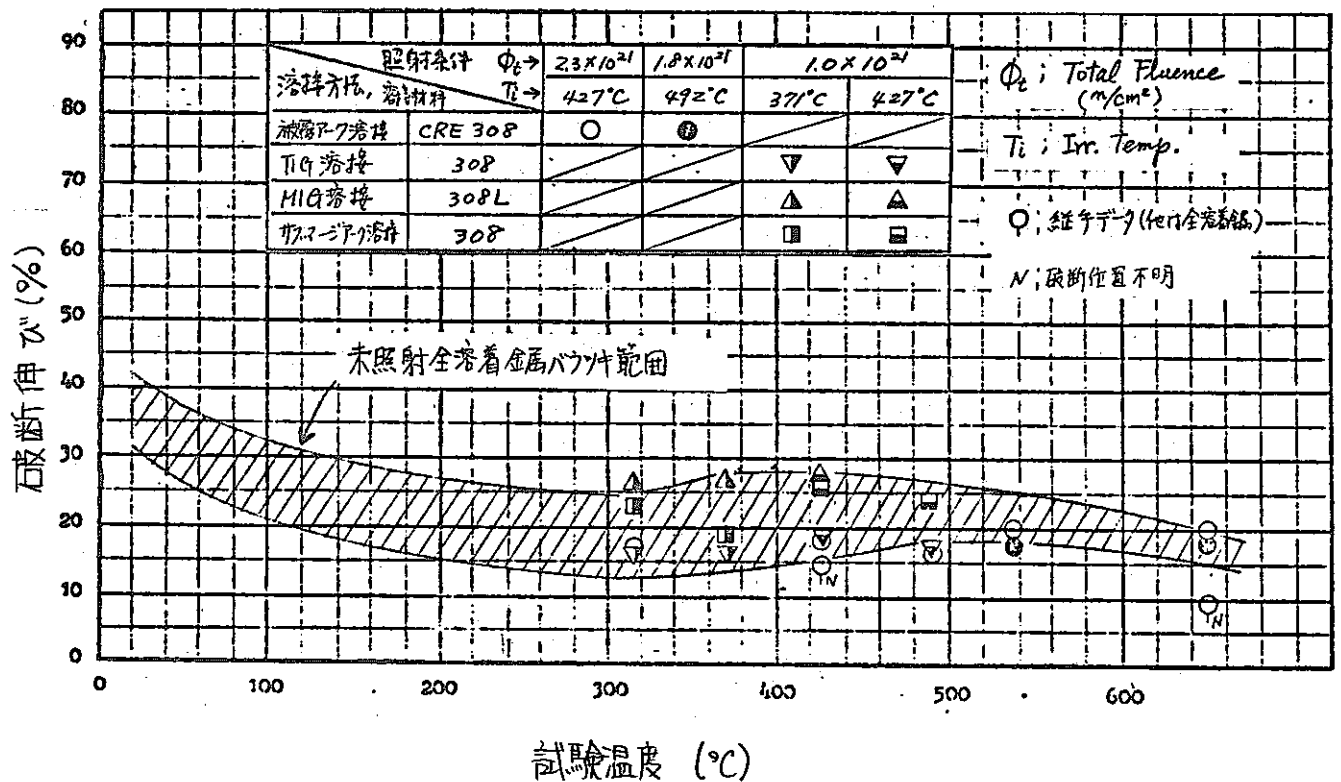


図4.2 308系溶接部の高温引張破断伸びにおよぼす照射の影響

4.2 クリーフ破断特性に対する照射効果^{3b)}

被覆アーク溶接を行った全着着金属および継手の照射後のクリーフ破断試験の結果を図4.3および図4.4に示す。

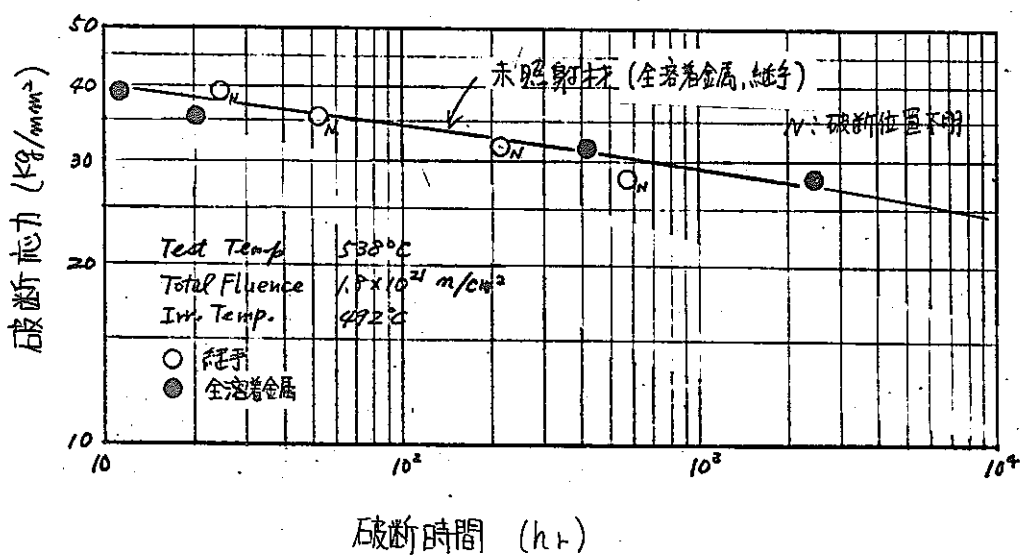


図4.3 308系溶接部の照射後のクリーフ破断強さ (被覆アーク溶接)

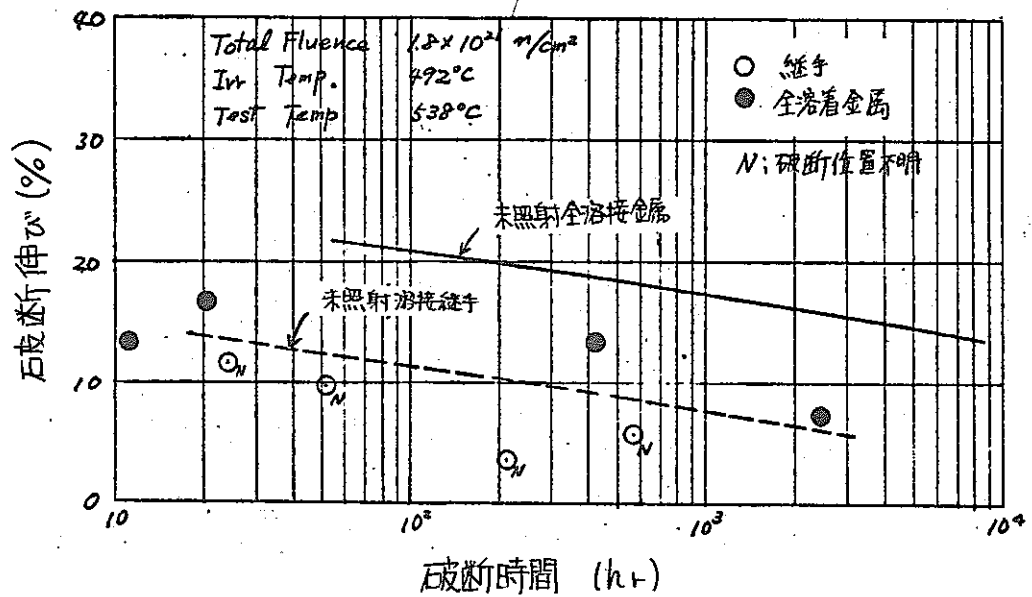


図4.4 308系溶接部の照射後のクリープ破断伸び (被覆アーケ溶接)

図4.3から照射後のクリープ破断強さは未照射材とほぼ同等の強さを有することがわかる。図4.4からクリープ破断伸びは全溶着金属および継手とも未照射材に比べて20~50%の低下が生じている。また全溶着金属に比べ継手の伸びがかなり低く存つてはいるがこれは前述のように標点間内の母材と溶接金属の割合やクリープ特性の違いあるいは破断位置によって左右されるので破断伸びの定量的な評価はむづかしい。

照射後のクリープ破断伸びを改善するためには未照射材のクリープ破断伸びを向上させる必要がある、原子炉容器および炉内構造物では照射効果を考え溶接部のクリープ延性の向上がより重要であることがわかる。

4.3 高温低サイクル疲れ強さに対する照射効果³⁷⁾

照射後の全溶着金属の高温低サイクル疲れ強さを図4.5に示す。データは試験温度が482°Cの場合であるが未照射材に比べ、低サイクル側で弱化、高サイクル側で強化の傾向があるがその大きさは必ずしも一致しなく、むしろ差を考えると照射効果はほとんどないものと思われる。この試験結果はひずみ速度が $4 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ とかなり大きな領域で得られたものであり、更に遅いひずみ速度や保持時間を有する場合の照射効果はまだ不明である。図4.4に示したクリープ破断伸びが照射により低下する事実を考えると疲れとクリープの相互作用下での寿命は照射により低下する可能性があるため今後検討を要する。

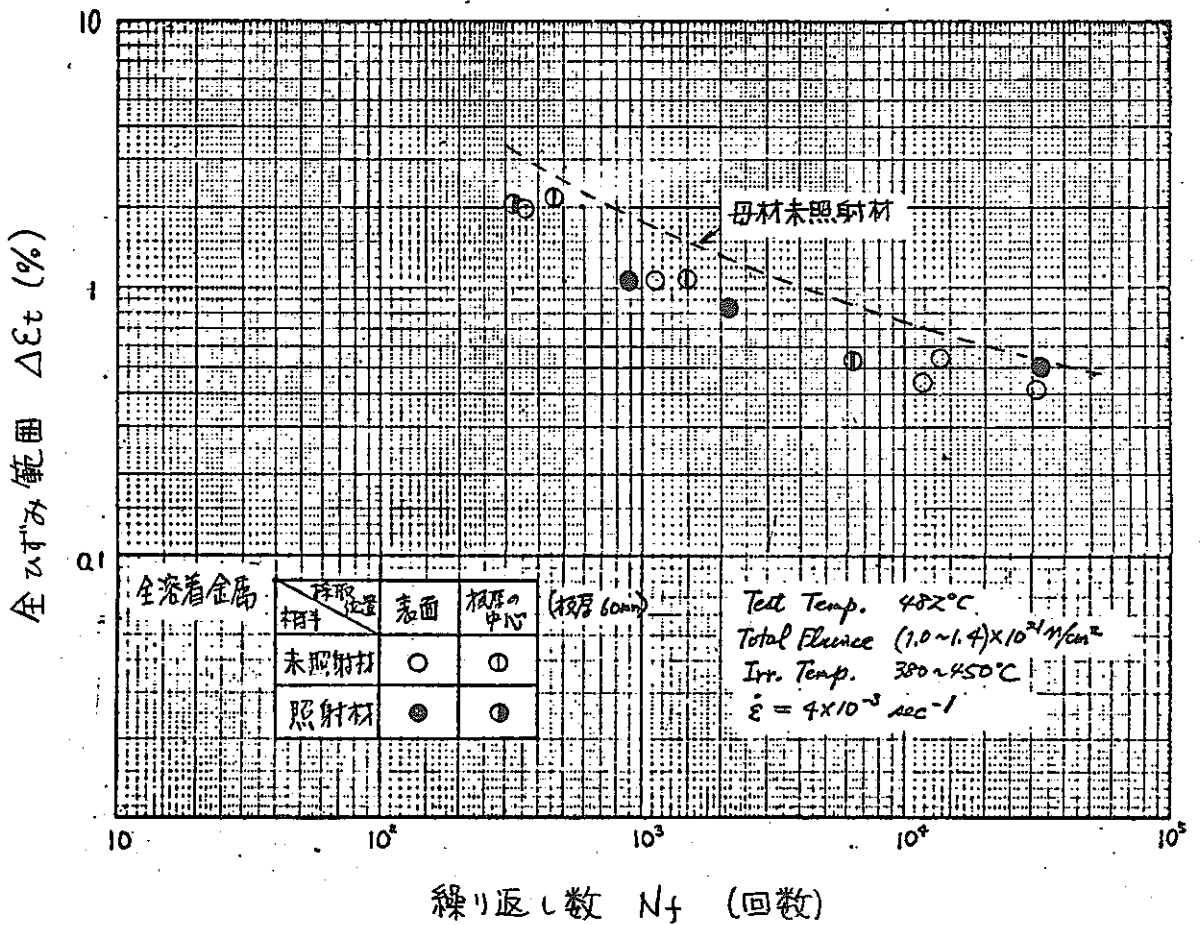


図4.5 308系全溶着金属の疲れ強さに及ぼす照射の影響(被覆アーケ溶接)

4.4 溶接部の環境効果の問題点について
 調査した結果から問題点を抽出すると以下のようになることである。

4.4.1 Na中の浸漬効果
 溶接部の試験結果が現時点ではないので今後の試験が必要である。

4.4.2 中性子照射効果
 照射によりクリープ破断伸が低下する傾向にあるので溶接部そのものの高温特性の改善が必要である。

(引用文献)

- 36) "Austenitic Stainless Steel Weld Materials A Data Compilation and Review"
 HEDL TME 74-25
- 37) Aerojet社レポート

5 今後必要な研究開発課題

以上の調査結果から明らかになった問題点を集約し、今後必要な研究開発課題についてまとめると表5.1のとおりである。

表5.1 各溶接材料の問題点と今後必要な研究開発課題

母材	溶接材料	問題点	今後必要な研究開発課題
304	308系	1) 標準試験法の未確立 2) 高温延性の不足 3) 高温特性データの不足 4) Na効果 5) 中性子照射効果	1) 高温延性の改善 2) 標準試験片による高温特性データの収集 3) 標準試験片によるNa浸漬試験 4) 標準試験片による中性子照射試験
316	316系 および 16-8-2系	1) 標準試験法の未確立 2) 高温特性データの不足 3) 高温延性の問題 4) Na効果	1) 標準試験片による高温特性データの収集 2) 高温延性の改善 3) 標準試験片によるNa浸漬試験
ZrC ₁ -1H ₀	ZrC ₁ -1H ₀ 系	1) 標準試験法の未確立 2) 高温特性データの不足 3) 高温延性の問題 4) Na効果	1) 標準試験片による高温特性データの収集 2) 高温延性の改善 3) 標準試験片によるNa浸漬試験

なおその他に厚肉オーステナイトステンレス鋼溶接部の非破壊検査法などの検討も必要である。

6 結言

高速原型炉に使用される溶接材料に関し現状と問題点を調査した。調査対象は溶接部の高温特性に主眼を置き、溶接材料の面から検討を加え現時点の最新の情報を収集するよう努めた。

調査結果からオ5章で述べたように我が国の溶接技術が克服しなければならぬ数多くの問題点が明らかになったので51年度以降の研究開発を強かに推進し問題点を解明する必要がある。なお溶接材料の開発は設計上のニーズに十分マッチさせることが必要であり今後とも設計側および製作側との密接な連携が必要である。