

# PWR 向け Alloy 690 異材継手部における溶接技術の開発

## Development of Welding Methods for Dissimilar Joint of Alloy 690 and Stainless Steel for PWR Components

松 岡 孝 昭 技術開発本部生産技術センター溶接技術部  
山 岡 弘 人 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 部長 博士(工学)  
平 野 賢 治 原子力セクター横浜第一工場技術グループ 部長  
平 野 隆 原子力セクター原子力プラント技術部 主幹

現在、PWR 型の原子力発電プラントでは、耐食性の観点から Cr をさらに添加した Alloy 690 系材料が多く使用されている。そこで、PWR 型原子力発電プラントの機器製造に向け、Alloy 690 系溶接材料の各種性能試験を実施し、最適な溶接材料の選定を行った。また、溶接施工の難しい異材の継手部に対して適正な溶接条件範囲の選定を行い、実機を模擬した異材配管により、溶接条件の検証を行った。その結果、非常に良好な継手を製作することが可能となった。

In this study, hot crack susceptibility of several kinds of Alloy 690 weld materials was evaluated by Vareststraint and hot ductility testing. The susceptibilities of the Solidification Cracking ( SC ), the Liquation Cracking ( LC ), and the Ductility Dip Cracking ( DDC ) of each filler material were independently evaluated by spot-Vareststraint and transverse-Vareststraint testing, and the susceptibilities of their DDC were compared through hot ductility testing. As some filler materials had low crack susceptibilities, we applied these filler materials to an Alloy 690 and stainless steel dissimilar pipe joint, which would be applied to the safe-end joint of a PWR reactor vessel. Proper welding conditions for all-position welding were selected from the viewpoints of weldability and process stability. Welding conditions can be organized using the power ratio equation, and the soundness of the practical joints and their properties were confirmed.

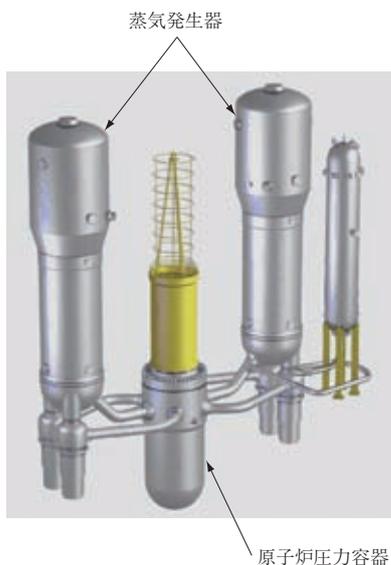
### 1. 緒 言

PWR ( Pressurized Water Reactor ) 型の原子力発電プラントでは、従来 Alloy 600 系材料で製作されていた配管などの主要機器に対して、耐応力腐食割れの観点から、近年 Alloy 690 系材料が採用されており、特に応力が発生する溶接部に対しても Alloy 690 系溶接材料が用いられている。この Alloy 690 系溶接材料は、30% Cr 添加した被覆溶接棒である INCONEL Welding Electrode 152 ( ENiCrFe-7 ) および GTAW ( Gas Tungsten Arc Welding ) などで使用される INCONEL Filler Metal 52 ( ERNiCrFe-7 ) が以前は用いられていたが、これらの材料は、溶接時の延性低下割れ ( DDC : Ductility Dip Cracking ) が発生しやすいことが知られており、このため、現在では、INCONEL Welding Electrode 152M ( ENiCrFe-7 ) と INCONEL Filler Metal 52M ( ERNiCrFe-7A : 以下、FM52M ) が DDC 低減のため開発され、適用されている。しかし、拘束の強い、極厚配管などの継手部では、依然として割れが発生する場合もある。このため、現在でも多くの溶接材料メーカーや研究機関において割れ防止の研究および溶接材料の開発

が盛んに行われている。

当社は、これまで BWR 型の原子力発電プラントメーカーとして多くの発電設備を製作しているが、現在、PWR 型原子力発電プラント機器の製造についても一部の機器を提供するなど新たなビジネスを展開している。特に AP1000 ( ウェスティングハウス・エレクトリック ( アメリカ ) : PWR 型原子炉 ) の主要機器である原子炉圧力容器 ( RV : Reactor Vessel ) や蒸気発生器 ( SG : Steam Generator ) について、製造技術の確立を行っており、ノズルセーフエンドなど非常に厚く、ステンレス鋼と Alloy 690 系肉盛部との異材継手となる部分に対して割れない健全な継手の製作を目指している。第 1 図に PWR 型原子力発電プラント主要機器を示す。

本稿では、このような拘束度が高く、Alloy 690 系溶接材料を用いる箇所に対して、最適な溶接材料を選定および、適正な溶接条件選定方法を確認したので、その内容を報告する。また、選定したこれらの溶接材料および溶接条件によって、実機を模擬した異材配管溶接を行ったため、併せてその結果を報告する。



第 1 図 PWR 型原子炉発電プラント主要機器  
Fig. 1 Main equipment of PWR nuclear power plant

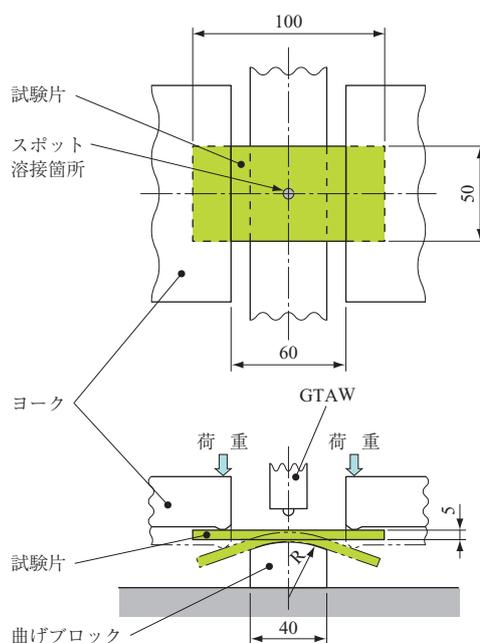
## 2. 試験方法

### 2.1 溶接材料特性評価

Alloy 690 系の溶接材料としては、FM52M などの市販溶接材料に加え、合金元素量を変更した数種類の開発溶接材料を試験に用いた。Filler-A, -B, -C は、ERNiCrFe-7 に、FM52M, Filler-D は ERNiCrFe-7A に対応した材料である。試験に使用した溶接材料の化学成分を第 1 表に示す。

#### (1) バレストレイン試験

高温割れ感受性評価のため、板厚 5 mm の試験片を用いてスポットバレストレイン試験を実施した。スポットバレストレイン試験装置の概念を第 2 図に示す。本試験では、試験片をボルトで曲げブロックに取り付けた後、GTAW によってビードオンプレート溶接を試験片中央に行い、アークの消弧と同時に試験片両脇のヨークを下げ、試験片表面に所定のひ



第 2 図 バレストレイン試験装置の概念 (単位: mm)  
Fig. 2 Schematic illustration of Varestreint test (unit: mm)

ずみを与える。これによって、溶接時に発生するひずみを模擬し、強制的に溶接時の高温割れを発生させる試験である。ひずみを加え、冷却した後、試験片を取り外し、溶接部近傍に発生した割れを光学顕微鏡などで観察し、最大割れ長さおよび総割れ長さ測定を行う。割れ長さの指標と付与したひずみ量の関係から、試験を行った溶接材料の高温割れ感受性を評価した。バレストレイン溶接条件を第 2 表に示す。

第 2 表 バレストレイン溶接条件  
Table 2 Varestreint test condition

項目	単位	仕様
電流	A	65 ~ 80
電圧	V	14
シールドガス	-	Ar

第 1 表 化学組成 (wt%)  
Table 1 Chemical compositions of filler materials used (wt%)

供試材	化学組成 (wt%)													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Nb+Ta	Al	Ti	Fe
ERNiCrFe-7	<0.04	<0.50	<1.0	<0.02	<0.015	28 ~ 31.5	残	<0.50	<0.30	-	<0.10	<1.10	<1.0	7.0 ~ 11.0
ERNiCrFe-7A	<0.04	<0.50	<1.0	<0.02	<0.015	28 ~ 31.5	残	<0.50	<0.30	<0.12	0.5 ~ 1.0	<1.10	<1.0	7.0 ~ 11.0
FM52M	0.02	0.09	0.8	0.003	0.001	30.06	59.54	0.01	0.02	0.027	0.83	0.11	0.224	8.22
Filler-A	0.01	0.11	0.16	0.005	<0.001	29.6	残	0.01	<0.01	-	0.05	0.21	0.39	9.9
Filler-B	0.01	0.12	0.16	0.005	0.001	29.9	残	0.5	0.01	0.01	0.05	0.21	0.3	8.8
Filler-C	0.022	0.2	0.49	0.001 3	0.000 3	29.7	58.6	0.001	0.001	0.002	0.001	0.006	0.52	8.7
Filler-D	0.025	0.2	0.51	<0.002	<0.001	29.6	59.5	<0.01	<0.01	<0.002	0.74	0.01	0.66	8.38

## (2) 高温延性試験

Alloy 690 系溶接材料において問題となる DDC を評価するため、高温延性試験によって、各溶接材料の高温での延性挙動を調査した。試験温度は 800 ~ 1 200℃とし、引張試験後の絞りによって比較を行った。高温延性試験条件を第 3 表に示す。

### 2.2 溶接試験

溶接材料特性評価によって選定した溶接材料について、溶接試験を実施し、割れ発生の有無を確認した。また、溶接試験では、溶接条件を種々変更し、溶接条件の割れへの影響を確認した。溶接材料については、選定した溶接材料および比較のため、割れ感受性の高い溶接材料についても試験を行った。

#### (1) 異材溶接試験

低合金鋼とステンレス鋼の異材継手を模擬した狭間先溶接試験片を用い、溶接後の断面観察によって割れ発生の有無を確認した。

#### (2) 円形はめ込み試験

RV 上蓋の継手を模擬した試験片を用い、溶接後の断面観察によって割れ発生の有無を確認した。

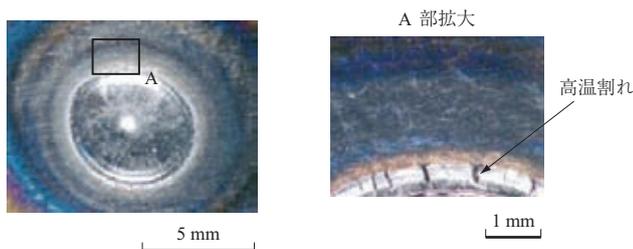
## 3. 結果および考察

### 3.1 溶接材料特性評価

バレストレイン試験における表面割れ観察の一例を第 3 図に示す。各ひずみ量に対する DDC および液化割れの総割れ長さとの関係を第 4 図に示す。試験の結果、DDC については、Nb 添加されている FM52M, Filler-D では

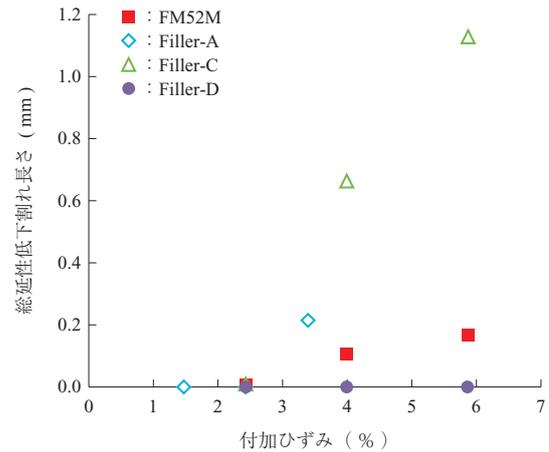
第 3 表 高温延性試験条件  
Table 3 Hot ductility test condition

項目	単位	仕様
試験温度	℃	800 ~ 1 200
加熱速度	℃ / s	16.7 ~ 21.7
引張速度	mm/s	0.025
雰囲気ガス	-	Ar

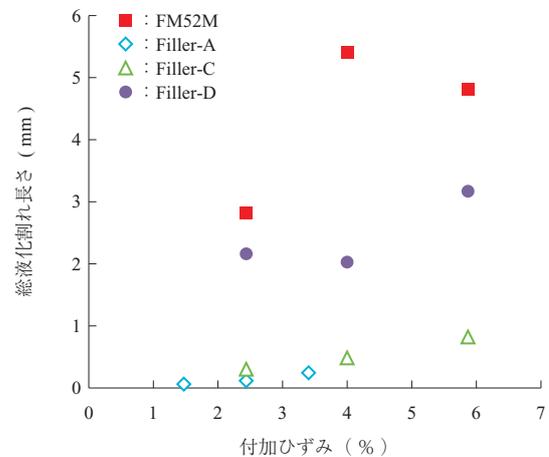


第 3 図 バレストレイン試験における表面割れ観察の一例  
Fig. 3 Example of hot crack in Varestraint test

(a) 延性低下割れ感受性



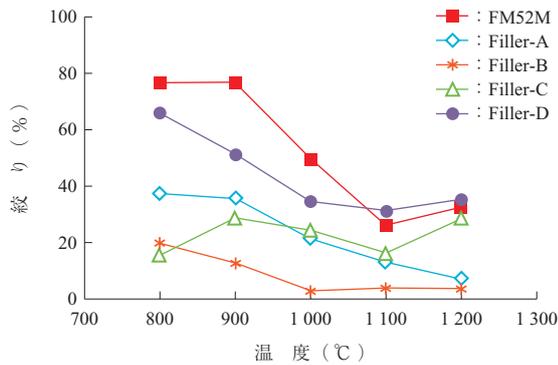
(b) 液化割れ感受性



第 4 図 バレストレイン試験結果 (総割れ長さと荷荷ひずみの関係)  
Fig. 4 Results of Varestraint test

総割れ長さが非常に短く、割れ感受性が小さい。また、液化割れの総割れ長さは、逆に Nb 添加されていない Filler-A, Filler-C は、非常に短く、Nb 添加溶接材では長くなることが確認された。Nb の添加による、液化割れ感受性の増大については、過去の研究においても報告されており、その傾向と良く一致している。しかし、割れ長さについては、約 6%ひずみ負荷した場合にも最大でも 5 mm 程度であり、過去の研究結果と比較し、いずれの溶接材料についても低いレベルにあることから、液化割れ感受性は、十分低いと考えられる。

高温延性試験結果を第 5 図に示す。高温延性試験では、いずれの材料についても 1 100℃近傍で延性低下が認められた。1 100℃における各溶接材料の延性とバレストレイン試験における各溶接材料の DDC 長さの傾向は比較的一致しており、DDC については、高温延性試験で簡易的な評価が可能と考えられる。



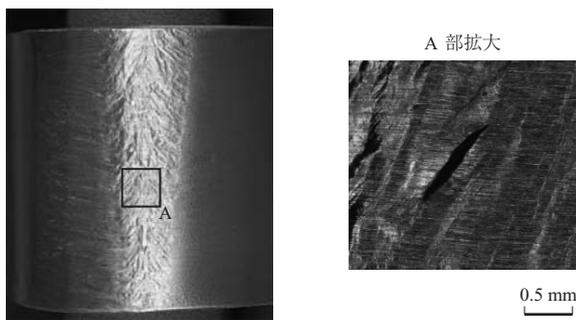
第 5 図 高温延性試験結果  
Fig. 5 Results of hot ductility test

割れ感受性試験の結果から、Nb を添加した溶接材料、すなわち、FM52M、Filler-D では、DDC 感受性が低いことから、候補材として選定した。

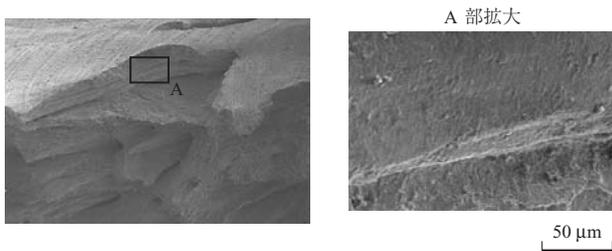
### 3.2 溶接試験

溶接割れ試験の結果、DDC が多く観察された。異材溶接試験における割れの一例を第 6 図に示す。溶接割れの破面観察結果を第 7 図に示す。破面形態は平坦であり、溶融した形跡は認められず、DDC 特有の破面形態であった。また、円形はめ込み試験においても同様に、DDC が発生していることが確認された (第 8 図)。

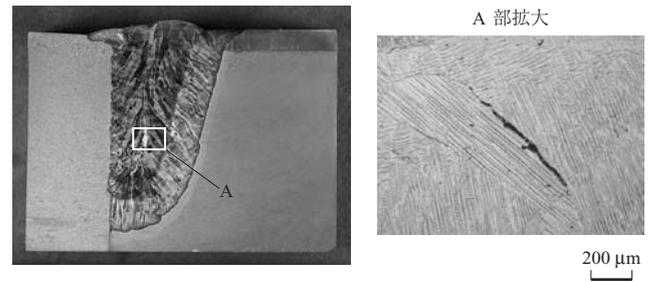
割れに影響を与える溶接条件として、入熱だけでなく、ワイヤ送給量も考えられる。このため、種々の溶接条件項目を考慮した指標である Power Ratio を用いて評価を行っ



第 6 図 異材溶接試験における割れの一例 (側曲げ試験)  
Fig. 6 Example of DDC in dissimilar joint test



第 7 図 溶接割れの破面観察結果  
Fig. 7 Fracture surface of DDC in dissimilar joint test



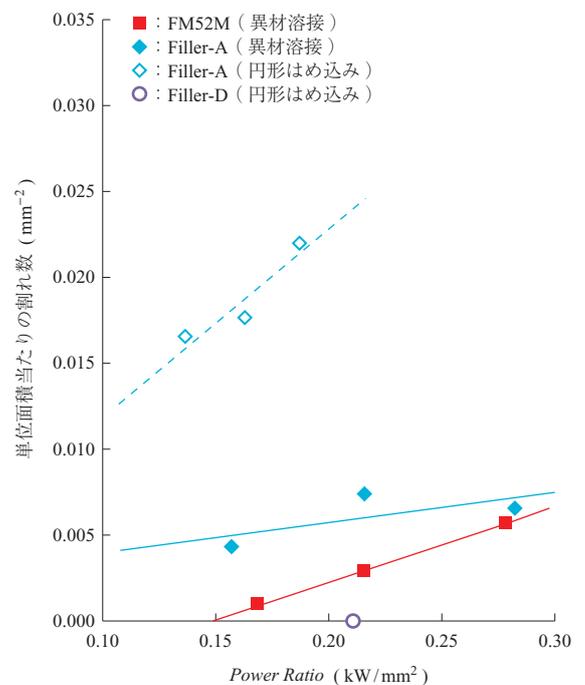
第 8 図 円形はめ込み試験における割れの一例  
Fig. 8 Example of DDC in circular patch test

た。Power Ratio の計算式を (1) 式に示す。Power Ratio を用いて各溶接試験における割れ発生数との関係を比較した結果を第 9 図に示す。

Power Ratio

$$= \frac{\text{溶接電流} \times \text{アーク電圧}}{(\text{ワイヤ断面積} \times \text{ワイヤ送給速度}) / \text{溶接速度}} \dots\dots\dots (1)$$

指標で整理した結果から、すべての溶接材料において、二つの溶接試験ともに Power Ratio の増加に伴い、割れ発生数が増加する傾向であった。溶接材料による割れ発生の違いについては、割れ感受性試験結果と同様に Filler-A では、割れが多く発生しており、感受性試験結果と良く一致している。また、各試験片形状に関しては、円形はめ込み試験は、異材溶接試験に比べ、非常に割れ発生数が増加する傾向であった。これは、試験片の形状による拘束度が



第 9 図 各試験における Power Ratio と割れ発生数の関係  
Fig. 9 Relationship between number of occurrences of DDC and Power Ratio

非常に高いことと、異材狭開先溶接試験では、狭開先の1層1パス溶接であるのに対し、円形はめ込み試験では、1層2～3パスとなるため、再熱回数が増加し、割れ発生につながったものと考えられる。

本試験結果から、FM52M を用いた場合には、*Power Ratio* を 0.15 (kW/mm<sup>2</sup>) 以下の溶接条件を選択することにし、Filler-D については、0.20 (kW/mm<sup>2</sup>) 以下の溶接条件を選択することにした。

#### 4. 異材配管継手による確性試験

選定した溶接材料および溶接条件を用いて、反応容器セーフエンドを模擬した異材配管継手の溶接を行った。溶接は全姿勢で行い、姿勢による割れ発生への影響を確認した。

溶接試験状況を第10図に示す。溶接材料は、FM52M を用い、*Power Ratio* を 0.15 (kW/mm<sup>2</sup>) 以下とした。

溶接後の断面観察結果の一例を第11図に示す。90°ごとに各方位での断面観察を行ったが、いずれの断面についても割れは認められず、良好な溶接であったことを確認した。また、側曲げ試験においても欠陥は認められず、選定した条件範囲が妥当であることを確認した。

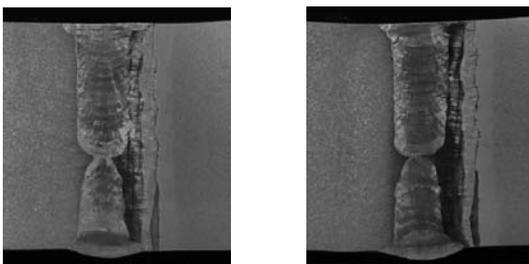
第4表に、側曲げ試験結果(確性試験)を、第12図に、側曲げ試験後の試験体外観(確性試験)を示す。

(a) 内面 (b) 外面



第10図 異材配管継手による確性試験状況  
Fig. 10 Situation of dissimilar joint welding

(a) 0°位置 (b) 180°位置



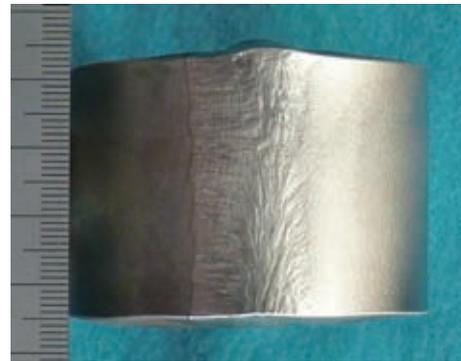
第11図 断面観察結果(確性試験)  
Fig. 11 Macrostructures of cross section for dissimilar joint welding

第4表 側曲げ試験結果(確性試験)

Table 4 Results of side bend test for dissimilar joint welding

試験片番号	結果	QW-163 *1
SB-1	欠陥なし	合格
SB-1	欠陥なし	合格

(注) \*1 : ASME (American Society of Mechanical Engineers) Section IXによる基準



第12図 側曲げ試験後の試験体外観(確性試験)  
Fig. 12 Results of side bend test for dissimilar joint welding

#### 5. 結 言

本検討から以下の結論を得た。

- (1) 溶接材料特性試験によって、各溶接材料の高温割れ感受性の比較を行った。その結果、FM52M、および開発材である Filler-D は、割れ感受性が低いことを確認した。このことから、これらを継手に適用可能な溶接材料として選定した。
- (2) PWR の RV/SG 異材継手部を模擬した試験体によって、高温割れと溶接条件の関係を検証した結果、高温割れは、溶接条件を加味した *Power Ratio* の増加とともに線型的に増加することを確認した。  
本結果から、各溶接材料における割れ防止可能な溶接条件範囲を選定した。
- (3) 選定した溶接条件を用い、セーフエンドを模擬した異材配管継手の溶接を行った結果、割れない健全な継手を得ることができた。

#### — 謝 辞 —

本開発のうち、バレストレイン試験実施に当たり、大阪大学大学院工学研究科 西本教授、才田教授の多大なご指導をいただきました。ここに記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) K. Nishimoto and K. Saida : Microcracking

- susceptibility in multi-pass weld metal of Inconel 690 Alloy IIW 2004 Commission IX-2097-04
- (2) W. Wu and C. H. Tsai : Hot cracking susceptibility of fillers 52 and 82 in alloy 690 welding Metallurgical and Materials Transaction A Vol. 30 No. 2 ( 1999 ) pp. 417 - 426
- (3) M. G. Collins and J. C. Lippold : An Investigation of Ductility Dip Cracking in Nickel-Based Filler Materials – Part I Welding Journal Vol. 82 No. 10 ( 2003 ) pp. 288 - 295
- (4) M. G. Collins, A. J. Ramirez and J. C. Lippold : An Investigation of Ductility Dip Cracking in Nickel-Based Weld Metals – Part II Welding Journal Vol. 82 No. 12 ( 2003 ) pp. 348 - 354
- (5) T. Saito : Developmet of Filler Alloy690 for Dissimilar Metal Joint IIW 2005 Commission IX-2180-05