

公募公告

平成29年 9月 6日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

研究連携成果展開部長 宮川 明

(住所) 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地1

下記のとおり公募します。

1. 公募に付する事項

(1) 件 名

核破碎中性子源水銀標的容器の大強度化対応のための溶接線近傍の割れ感受性及び溶接時の力学特性に関する研究

(2) 内 容

別添共同研究計画書のとおり

(3) 履行期限

平成30年1月31日

2. 公募に参加する者に必要な資格に関する事項

(1) 公募参加資格

国もしくは機構の競争参加資格を有すると認められた者とする。なお、機構の競争参加資格の認定を受けていない者であっても、参加意思確認書を提出することができるが、その者が応募要件を満たすと認められ、競争的契約手続きに移行した場合に技術提案書等を提出するためには、技術提案書等の提出時までには、当該資格の認定を受ける必要がある。

(2) 公募に参加できない者

競争に係る契約を締結する能力を有しない者及び破産者で復権を得ない者。資格審査申請書及びその添付書類に故意に虚偽の事実を記載した者等。

3. 応募要件

- (1) バレストレイン試験機を有し、それを用いた実験及びその評価に必要な専門的な知見・技術力を有すること。
- (2) 溶接過程を模擬した入熱及び冷却によって、溶接過程で発生する温度場や応力-ひずみ場を評価する数値解析の実績を有すること。また、溶接過程を模擬した数値解析を行うために必要な専門的な知見・技術力を有すること。
- (3) 溶接に関する研究に携わっており、特に溶接割れに関連する専門的な知見及び技術力を有すること。

4. 応募要件等を満たす意思表示

本公募に参加を希望する者は、3項に示す応募要件を満たすことを証明する資料を参加意思確認書に添付の上、以下の期限までに「6. 連絡先」まで、持参又は郵送（書類書留郵便等の配達記録が残るものに限る）により、提出すること。

上述の資料の様式は自由とするが、応募者の組織として意思決定が確認できる書類とする。

応募要件を満たす者があった場合には、機構は、応募要件の遂行能力を確認し、確認結果を書面にて通知する。

期限：平成29年9月20日（水）必着（郵送による場合も同様とする）

5. 備考

- (1) 応募がなかった場合には、特定の者と随意契約を行う。
- (2) 応募があった場合で、かつ確認の結果合格者があった場合には、企画競争により決定することとなる。その場合には別途公告する。
- (3) 手続きにおいて使用する言語及び通貨は、日本語及び日本国通貨に限る。

6. 連絡先

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

J-PARCセンター業務ディビジョン利用業務セクション 星野 淳子

TEL : 029-284-3170

核破碎中性子源水銀標的容器の大強度化対応のための
溶接線近傍の割れ感受性および溶接時の力学特性に関する研究

共同研究計画書

1. 共同研究件名

核破砕中性子源水銀標的容器の大強度化対応のための溶接線近傍の割れ感受性及び溶接時の力学特性に関する研究

2. 研究目的

J-PARCの核破砕中性子源では、加速器で光速近くまで加速した陽子ビーム(3 GeV)を標的材である水銀に入射し、核破砕反応により中性子を発生させ、中性子をプローブとした実験に供する。水銀は、水銀容器、及び二重容器構造の保護容器で構成される三重容器内を流動する。この三重容器を水銀標的容器と呼ぶ。

水銀標的容器は溶接構造物であり、TIG溶接を用いた完全溶け込みによる突合せ溶接による製作方法を原則として採用している。また、中性子発生効率と構造強度を考慮して容器の板厚が変化する設計であるため、板厚が変化する部位を溶接する場合があります。一部では、急激に板厚が変化する溶接箇所も存在する(溶接長さ5mmの範囲で板厚が5mm変化)。

これまで、1 MWの大強度陽子ビームによる運転を目指して、徐々に出力を増大してきたが、平成27年度、陽子ビーム出力500 kWで運転を行った際に、発生箇所は異なるが、保護容器において2回欠陥が発生する不具合が起こった。この原因を明らかにするため、実機と類似の溶接法で模擬試験体を製作して調査した結果、溶接部近傍で、微小なき裂が発生することが確認されたが、そのメカニズムについては十分に明らかにされていない。このため、溶接部近傍におけるき裂発生原因を同定するとともに、き裂発生を防ぐ溶接方法を選定することが喫緊の課題である。また、1 MW運転の実現に向けて、本容器に対して高い製作精度で、高い信頼性を有する溶接方法を開発することが重要な課題である。

欠陥が発生した要因として、1) 欠陥が発生した実機の保護容器や模擬試験体で使用したSUS316L材では、溶接時に高温割れを起こしやすいリン(P)および硫黄(S)の成分比が高かったこと、2) き裂が発生した場所は複雑な形状で、そこを加工する際に用いるワイヤ放電加工によって表面に加工層が残っていたこと、3) き裂が発生した場所は溶接部に急激な板厚変化を有しており、溶接時に応力集中により過大な応力が発生すること、等が考えられた。そこで、平成28年度の共同研究では、溶接部材料に要求される条件、及び溶接時の溶接部近傍での温度や応力状態の観点から、き裂発生原因を同定し、き裂発生を防ぐ溶接方法を選定することを最終目標とし、SUS316L鋼を用いて試験と解析を実施した。さらに、高い製作精度が期待できるレーザ溶接について同様の試験・解析を実施し、容器の溶接方法としての適用性を検討し、以下の結果を得た。

- ① バレストレイン試験(歪みレンジ: 0.8~2.4)の結果では、き裂長さは0~0.65 mmであった。P及びSの成分比を変化させた2種類の組成を持つSUS316Lの溶接による割れやすさ(割れ感受性)は低く、割れにくい部類であると言える。PやSの成分比の影響は、調べた範囲(P+S: 0.021~0.038wt%)においては、明確な依存性は認められなかった。しかも、同じ歪み量を与えた場合、予想に反して低P+Sの方が、き裂長さがわずかに長かった。さらに今回のP+S濃度範囲においては、PやSの成分比よりも、Cr等量/Ni等量の比(1.58~1.70)のほうが、割れ感受性に対して影響が現れる傾向が認められた。すなわち、低いCr等量/Ni等量比の材料の方が割れやすい傾向であった。
- ② ワイヤ放電加工の影響を調べるために行ったバレストレイン試験の結果では、ワイヤ放電加工による表面加工材は、機械加工表面材に比べて、今回の試験では、発生するき裂が若干短くなる傾向にあり、ワイヤ放電加工による表面加工層の割れ感受性は低い。

- ③ 溶接部近傍の温度場と応力-ひずみ場の解析結果では、溶接部近傍の不連続部に応力集中が生じていることを評価した。また、急激に板厚が厚くなる部位では、溶接時の入熱を急激に増やす必要があることが分かった。しかし、施工メーカーから提示された溶接条件に、実際の溶接可能な温度条件にならない不備があったため、阪大側が溶融条件になるように溶接条件を仮定して評価を行ったため、実際の溶接条件に対応した定量評価とはなっていない。
- ④ レーザ溶接に関しては、研究機関で所有するレーザにより、溶接割れ感受性評価を実施したが、対象とする材料の BTR (Brittleness Temperature Range) 特性が良かったため、当該装置で適用できるレーザ出力値(～ 4 kW)、ならびにレーザ稼動装置では、溶接割れを発生させるための Circular Patch 試験が不可能であった。

一方、原子力機構 J-PARC では、溶接条件を実機相当として、模擬試験体でのき裂発生再現性、及びき裂発生に及ぼす P と S の成分比の影響を評価するために、これらの組成の異なる模擬試験体を用いて、再度溶接試験を行った。この時、溶接条件を正確に把握し、溶接時の温度変化を測定した。この溶接試験の結果、上記②の項の検討の際に行った試験と同様に、溶接部近傍でき裂が発生することを確認した。

平成 29 年度は、平成 28 年度の結果に基づき、溶接部近傍の割れ感受性に対し、Cr 等量/Ni 等量比の観点で調査する。また、現在の J-PARC の水銀ターゲット容器の製法で採用している板厚が急激に変化する溶接、並びに溶接部近傍の段差などが及ぼす溶接時の温度、応力-ひずみ場等の力学特性に関し、平成 28 年度に取得した溶接条件で数値解析を実施し、試験で取得した温度分布結果を用いて数値解析の検証を実施した後、溶接施工条件における温度や応力-ひずみ状態等の力学特性を定量的に評価し、き裂発生に及ぼす影響を評価する。これらの結果を基に、材料の溶接割れ感受性及び溶接時の力学特性を明らかにし、実機における欠陥発生事象の原因を同定し、高出力化に向けた水銀標的容器の溶接方法の高度化に資する。

3. 研究内容

平成 29 年度の共同研究では、前年度に機構側で溶接条件を明確にした SUS316L 鋼(2 種類の組成、2 種類のサイズ：計 4 種類)の模擬試験体を用いた溶接試験の結果を基に、溶融形状とその分布を詳しく調べるとともに、溶接部断面の金相観察等を実施し、溶接部凝固の際の初相形態を調査する。また、現状の模擬試験体に存在する、溶接前の二つの部材間の段差が、溶接割れ発生に及ぼす影響も調べるために、段差の有無を模擬した試験体での溶接時の温度、及び応力-ひずみ場の解析評価を実施する。これらの結果に基づき、実機で生じていると予想される溶接現象の詳細な解明を進める。

具体的に実施する主な研究内容を以下に示す。

・割れ感受性に及ぼす Cr 等量/Ni 等量比の評価

平成 28 年度のパレストレイン試験に用いた材料の Cr 等量/Ni 等量比は、高 P+S 材、及び低 P+S 材で、それぞれ、1.66 及び 1.56 で、高 P+S の Cr 等量/Ni 等量が高い材料であった。また、低 P+S 材の Cr 等量/Ni 等量比は、溶接部が再凝固する際の初相がオーステナイト相となり高温割れが発生しやすい等量比に近い。平成 28 年度に機構で実施した、パレストレイン試験に用いたものと同じ成分を用いた材料で、溶接模擬試験体を用いて以下を実施する。

- (1) SUS316L 鋼における、Cr 等量/Ni 等量が、割れ感受性に及ぼす基本的な特性として、凝固開始時の初相を同定するために、溶接試験後の組織観察を行う。こ

- れにより、初相が、割れが発生しやすいオーステナイト相であったのか、割れ感受性の低いフェライト相であったのかを明らかにする。
- (2) 溶接部形状を測定し、下記の数値解析の条件に資するとともに、溶接時の溶け込み具合に対する、材料の組成の影響を評価する。
 - (3) 模擬試験体で観察された割れの種類の同定に資するため、模擬試験体を切断しながら、割れが発生した領域を正しく把握（例えば、溶接材の部位であるのか？HAZなどの領域にあるのか？）する。必要に応じて残留応力などの解析も行う。

・溶接施工時の応力-ひずみ状態に関する解析的評価

平成 28 年度に機構で実施した再溶接模擬試験の溶接施工条件を入力条件として、有限要素法を用いた熱弾塑性解析を行い、多層盛り TIG 溶接時の溶接部近傍の温度場、及び応力-ひずみの変動場を明らかにする。これらの解析結果に基づいて模擬試験体溶接時に認められたき裂発生原因を同定し、7号機の実機ミラー部で生じたと考えられる、き裂からの欠陥発生の可能性について考察し、最終的に破損原因の結論を得ることを目標とする。さらに、その解析結果を今後のターゲット容器製作時の溶接技術に反映する。

なお、解析対象とする形状は、き裂が発生した模擬試験体と同じく二種類から三種類であり、継手形状も複雑であるため、解析用モデルの作成が困難であるだけでなく、汎用の有限要素解析ソフトでは、研究期間内に解析を完了することが困難と考えられる。そこで解析には、反復サブストラクチャー法を用いた熱弾塑性解析法を活用する。

・中性子源の高出力化に向けた水銀標的容器の製作技術に関する溶接方法を含めた総合的評価

上記の試験、解析評価結果を基に、水銀標的容器の溶接方法の指針を提案する。具体的には、割れ感受性試験に用いた試料の組織観察や局部強度（硬さ）測定を行い、割れ感受性試験結果と比較し、割れ発生の原因を明らかにし、本容器製作に使用する材料の成分や熱処理の仕様、及び溶接施工前の材料の表面処理法等の指針をまとめる。また、試験体の温度場、及び応力-ひずみ場の解析結果とともに、運転時に容器に負荷される応力を有限要素法により評価し、運転時の負荷が低く、溶接時に割れが発生しない溶接箇所を示す。

また、これまで水銀ターゲット容器は SUS316L 鋼で製作されてきたが、SUS316LN 鋼は SUS316L 鋼に比べて強度が高いことが知られており、構造設計の裕度を上げる事ができる。溶接割れ感受性の指標となる BTR 値について、材料の組成的に SUS316LN のその値は SUS316L とほぼ同様な値を持つことが推定されるが、正しい現象を把握するため、SUS316LN 母材の溶接割れ感受性をバレストレイン試験により評価を行う。

以上の結果から、中性子源の高出力化に向けた水銀標的容器の製作技術について総合的にまとめるとともに、大強度化のための核破碎中性子源水銀標的容器の溶接方法について、溶接線近傍の割れ感受性及び溶接時の力学特性に関する研究結果を基に、水銀標的容器に対してより信頼性の高い溶接方法検討する。

4. 研究実施分担

項目	共同研究先	原子力機構
溶接模擬体の熔融状態と熔融分布,及びき裂生成分布の観察と分析	○	◎
溶接近傍部の応力-ひずみ変動場解析	◎	○
材料供給(割れ感受性試験用)		◎
割れ感受性試験	◎	○
中性子源の高出力化に向けた水銀標的容器に関する溶接方法を含めた総合的評価	○	◎

(◎：主担当)

5. 研究総括責任者

(代表者名)

共同研究先： 契約締結時に決定する。

原子力機構： J-PARCセンター
物質・生命科学ディビジョン 中性子源セクション
研究副主幹 粉川 広行

6. 実施場所

共同研究先

日本原子力研究開発機構・J-PARCセンター
使用設備： (局部強度試験装置) 微小硬さ試験装置など
(顕微鏡) SEMなど

7. 研究期間

契約締結日 から 平成30年1月31日

8. 研究実施工程

項目	平成29年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
溶接模擬体の熔融状態と熔融分布,及びき裂生成分布の観察と分析						試験体準備						
						観察・分析						
溶接施工時の応力-ひずみ状態に関する解析的評価					解析モデルおよび条件策定							
					解析および結果評価							
SUS316LN 鋼のバレストレイン試験(溶接割れ感受性評価)					試験体準備および試験法策定							
					試験・割れ評価							

9. 提出図書

研究費用途を含めてとりまとめた最終報告書を双方に提出すること（1月末）

10. 支給品

バレストストレイン試験用試料

11. 放射性廃棄物の発生の有無

無

12. 外来研究員等の受入の有無

無

13. その他

以上