

# FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉用材料挙動の解明

(受託者) 国立大学法人京都大学

(研究代表者) 義家敏正 原子炉実験所

(再委託先) 独立行政法人核融合科学研究機構、国立大学法人福井大学

(研究開発期間) 平成 22 年度～24 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

加速器と原子炉（未臨界体系）を複合した加速器駆動未臨界炉（ADSR）は燃料増殖と核変換処理を同時に達成し、安全性と環境調和性に優れた革新的なエネルギー発生装置・中性子源となる可能性を秘めている。この ADSR の成立性評価には、加速器技術、未臨界炉技術、炉材料技術及び除熱技術に関する基礎的知見の取得と蓄積が不可欠である。

本事業では FFAG 加速器を用いた ADSR の成立性に関連して、加速器ターゲット周辺部の高エネルギー粒子と高密度の熱に曝される材料の挙動を解明し、材料工学的及び熱工学的観点から ADSR 建設に寄与することを目的とする。平成 23 年度は陽子ビームの増強、低温冷凍機の設置、KUCA 内照射のための複合ターゲット作製、鉛ビスマスループの作製等の装置の整備と、各種試料の電気抵抗測定、機械試験、陽電子消滅分光測定、KUCA のにおける中性子スペクトル測定、陽子ビーム照射による濡れ性への影響の測定等を行い、最終年度のための準備を行った。

## 2. 研究開発成果

### (1) ターゲット材料照射研究

#### ① ビームラインの設置

平成 22 年度に設置した FFAG 加速器の材料照射専用のビームラインにビーム集束装置を設置して、照射時のビーム径を制御した。原子炉実験所では、ADSR 開発のために FFAG 加速器の高度化が本事業とは別に行われており、陽子ビームの強度増強がその一環として年次計画で実行されている。その結果平成 22 年度に比べて平成 23 年度では約 10 倍のビーム増強が可能になった。平成 24 年度では加速電圧を 150MeV 近くまで上げて陽子ビーム照射実験を行う予定である。

#### ② 照射チェンバーの設置

陽子ビームの低温照射が可能のように低温冷凍機を設置し、照射中の試料の温度を制御できるようにした。装置はコンプレッサ部とコールドヘッド部からなり、冷凍能力は 0.5 W でコールドヘッド部の最低温度は 4 K 以下である。

#### ③ 機械試験

加速器本体室に設置した機械試験装置を中心に各種装置の遠隔監視・操作を行うために、VPN (Virtual Private Network) を設置した。VPN では LAN でつながっているパソコンを操作することができる。加速器本体室に設置したパソコンを加速器制御室で操作し、各種のデータの取得を行った。11 MeV 加速器で 23 時間、573 K で照射した試料の引張試験結果を図 1 に示す。

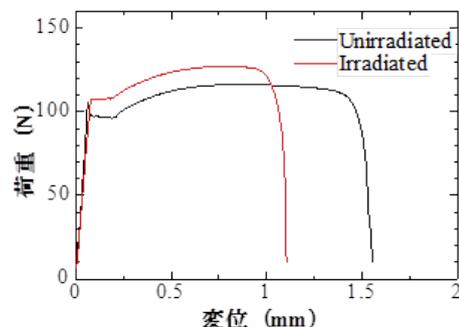


図 1 FFAG で 573 K、加速電圧 11 MeV、23 時間の陽子照射した V-4Cr-4Ti の引張試験結果。照射後の変化が見られる。

#### ④ 電気抵抗測定

低温での 100 MeV 陽子ビーム照射中の電気抵抗測定を行った。電気抵抗は欠陥が生成すると増加するので、陽子ビーム照射による欠陥の生成量を評価することができる。入射粒子が核破砕反応を起こすような高エネルギー粒子の場合、核反応データベースが完全ではない。最近では PHITS コードを用いた Iwamoto らの計算があるが、その信頼性は実験的には確認されていない。そのためにも電気抵抗で欠陥生成量を評価することは重要である。

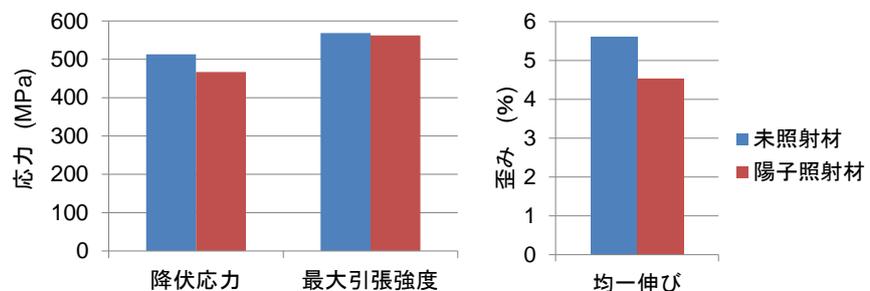
#### ⑤ バナジウム合金照射試験（再委託先：核融合科学研究所）

平成 22 年度に製作した V 合金から微小試験片を加工した。573 K 付近またはそれ以上の比較的高温での材料特性を衝撃試験、引張試験、硬さ試験、微細組織観察から評価した。大学共通の参照材料である NIFS-HEAT-2 V 合金 (NH<sub>2</sub>, V-4Cr-4Ti 合金) 及び、耐照射性を改善するために微量 Y を添加した V-4Cr-4Ti-0.15Y 合金、V-6Cr-4Ti-0.15Y 合金、V-10Cr-4Ti-0.15Y 合金を準備し追加加工して微小試験片を採取した。今後は、373 K~573 K の比較的低温にて照射特性、特に陽子ビーム照射による照射硬化の評価を行い、V 合金の使用可能温度、照射条件の範囲について検討し、研究のまとめを行う予定である。

#### ⑥ フェライト鋼照射試験（再委託先：福井大学）

FFAG 加速器で照射可能なフェライト鋼試料を福井大学にて作製後、FFAG 加速器照射を行い、TEM 観察及び各種特性評価した。一部持ち出し可能な試験片については福井大学にて TEM 観察及び各種強度試験を行い、損傷組織変化と強度特性変化を調べた。Fe-9Cr.mod 合金を加工、電解研磨することで、微小引張試験試料と抽出レプリカ法用の試料を作製した。その後、FFAG 加速器を用いて陽子ビーム照射を室

温、100 MeV の加速電圧で 50 時間行った。図 2 に非照射材及び陽子ビーム照射材の機械的性質変化を示す。陽子ビーム照射材について



は若干の硬化が確認された。

図 2 非照射材と陽子ビーム照射材の機械試験結果。

#### ⑦ オーステナイト系ステンレス鋼照射試験

100 MeV の陽子ビーム照射を室温で行い、その後陽電子消滅寿命測定を行った。表 1 は 100 MeV、50 時間照射後の陽電子消滅寿命測定結果である。ステンレス鋼を含む各種の試料の測定結果をまとめて示す。各試料は A1 製の板の間に挟み固定して照射された。核反応を考慮して入射面からほぼ一様であると見なすと、損傷率は Ni で  $7.1 \times 10^{-11}$  dpa/s、全損傷量は  $1.3 \times 10^{-5}$  dpa である。いずれの試料も照射後陽電子消滅寿命が増加し、照射欠陥が生成したことを示している。

#### ⑧ 高融点金属照射試験、Al 合金照射試験と照射後特性試験

W は密度も高く高融点金属の代表的なものである。核破砕による中性子発生効率が高いため、

ADSR のターゲットの候補材料である。Al は、低放射化材料であり、その合金である A5052 は現在の京都大学研究用原子炉の炉壁や配管類の材料として使用されている。原子炉実験所で小型の ADSR を作るとすれば、Al 合金が炉内構成物として用いられる可能性が高い。以上の理由から、W と Al 合金の陽子ビーム照射を行った。陽電子消滅寿命測定の結果は他の金属の結果とまとめて表 1 に示した。

表 1 100 MeV、室温で陽子照射した各金属の陽電子消滅寿命測定結果。

Specimens	$\tau_m$ (ps)	$\tau_1$ (ps)	$\tau_2$ (ps)	$I_2$ (%)
Ni	109±0.2	10±10.6	109±0.4	92.2±3.0
Fe-16.13Cr-16.96Ni	110±0.2	48±6.5	114±1.0	87.9±1.9
Fe-15.39Cr-15.92Ni-2.68Mo-1.89Mn	110±0.2			
Fe-15.27Cr-15.8N-2.66Mo-1.88Mn-0.53Si	113±0.2	95±3.3	149±8.9	30.1±8.7
Fe-15.27Cr-15.8N-2.66Mo-1.88Mn-0.53Si-0.24Ti	109±0.2	97±1.9	116±1.6	53±0.07
SUS316L	110±0.2	41±8.7	112±1.0	90.5±1.7
SUS316	109±0.2	100±1.9	117±2.7	40.7±0.1
Ti 添加改良型 SUS316	110±0.2	45±8.0	113±1.0	90.0±1.8
Al 合金 A5052	153±0.2			
Fe-9Cr	134±0.2	60±5.4	142±1.2	84.8±1.8
V-4Ti-4Cr	126±0.2	100±29.3	132±11.1	74.1±48.7
W	114±0.3			

#### ⑨ KUCA 内照射試験

FFAG 加速器から発生する中性子のエネルギースペクトルを変更するために、陽子ビームを当てるターゲットをこれまでの W を用いた場合と、新たに W と Be (W+Be) を組み合わせた複合ターゲットに変更した場合について実験を行った。中性子を発生させるターゲットの位置を変更し、各体系において In ワイヤ（直径 1.5 mm）を用いて反応率分布を測定した。その結果よりターゲット位置を炉心に近づける方が炉心内の中性子束が高くなり、中性子発生量が少なくなってもこの方が炉心出力を高くできることが分かった。また、W のみのターゲットと、W と Be を組み合わせた複合ターゲットの結果を比べると、複合ターゲットの方が中性子束が大きくなった。このことから、複合ターゲットを用いることにより炉心の中性子増倍に影響を及ぼす中性子を効率的に発生できることが分かった。これらの結果と、解析結果とを比較することにより、炉心内での中性子の増倍を定量的に評価するための解析を現在進めているが、今後の ADSR 実験研究を行う上で大いに役立つデータを得ることができたと考えられる。

#### (2) 除熱技術研究

ADSR ターゲットとして、W や Ta 等の固体重金属を用いた固体ターゲット及び PbBi 等の液体金属を用いた液体金属ターゲットが考えられる。本事業では、両者の開発において問題となる熱流動と陽子ビーム照射の影響を実験的に明らかにし、ターゲット開発において必要となる設計指針を得ることを目的とする。平成 23 年度は、平成 22 年度に引き続き非照射場における熱伝達実験と金属サンプルを用いた陽子ビーム照射実験を行い、陽子ビーム照射による濡れ性への影響を調べた。

#### ① 固体ターゲット実験

直径 10 mm の伝熱面を用いた強制流動沸騰実験を行い、沸騰熱流束と過熱度を計測した結果、質量流束が増加すると、気泡微細化沸騰 (MEB) が発生し易くなることが分かった。また、質量流束を一定にして、サブクール度を変化させた場合は、サブクール度が大きいほど MEB 熱流束が上昇した。これは、発生した蒸気泡の周りで大きな温度差が発生するほど、急激な凝縮がおり、気泡の微細化が起こるためと考えられる。今後、流動条件を一定にして、照射により濡れ性を変化させた実験を行い、更に MEB の特徴を調べる必要がある。

FFAG 加速器施設を用いた照射実験を行い、陽子ビーム照射が試料の濡れ性に与える影響を調べた。Cu の照射結果の一例を図 3 に示すが、100 MeV 陽子ビームを 50 時間照射した場合には、酸化膜の有無によらず濡れ性が改善していることが分かる。しかしながら、材質によっては、明確な変化が見られない場合もあった。右図の Cu においては、照射時間の増大と共に濡れ性は単調に減少しており、濡れ性の改善が観察される。今後、濡れ性に及ぼす材質の影響を詳しく調べる予定である。

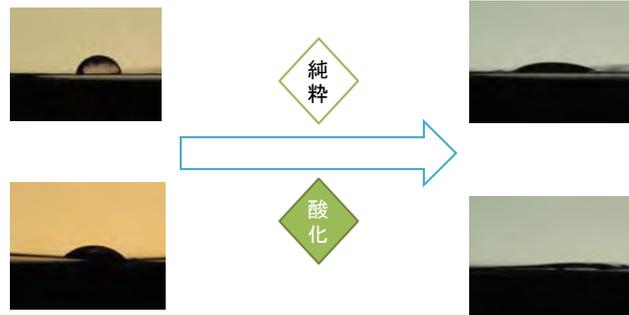


図 3 100 MeV 照射における Cu の濡れ性変化。

## ② 液体金属ターゲット実験

平成 22 年度に液体金属ループの設計を行い、平成 23 年度は、長時間安定に駆動できる鉛ビスマスループを作製し、気密テスト及び加熱テストを行い、正常に動作することを確認した。

以上、非照射場における熱伝達実験、金属試料の陽子ビーム照射実験及び液体金属実験を行い、平成 23 年度の研究予定を計画通り終了した。平成 24 年度には、照射条件が濡れ性に及ぼす影響と熱伝達に及ぼす影響を詳しく調べる予定である。

## 3. 今後の展望

2 年目である平成 23 年度は、初年度の業務を発展させると共に、最終年度に向けての準備作業を行った。ターゲット材料照射研究では、陽子ビームラインにビーム集束用の四重極電磁石の設置、照射チェンバーに低温冷凍機を設置しその性能の確認と低温での照射中・焼鈍中の電気抵抗変化測定、機械試験中のデータを加速器本体室から制御室へ転送するシステムの完成と引張試験、フェライト鋼照射試験における損傷組織変化と強度特性変化相関の評価、Al 合金、W、V 合金、フェライト鋼、オーステナイト系ステンレス鋼の照射試験と照射後の陽電子消滅寿命測定と欠陥形成の確認、KUCA 内での中性子スペクトル測定の高度化等を行った。除熱技術研究では、固体ターゲット実験として 100MeV 及び 11MeV の陽子ビームを用いた照射実験と濡れ性の変化の測定、液体金属ターゲット実験として、鉛ビスマスループの作製と気密テスト及び加熱テストを行った。

以上、第2年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。最終年度には残されている装置の整備、例えばビームストップ等の設置を終了し、陽子ビームの加速電圧を、100 MVから150 MV近くへ昇圧させての照射実験を行い、成果をまとめる予定であり、最終年度の業務遂行の見通しも立っている。