

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) 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所、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

今後も原子力エネルギーが社会の基盤を支えるエネルギーであるならば、より安全で機能性が高く、資源の有効利用に道を拓き、核燃料サイクル上で柔軟性を有する原子力システムを開発しなければならない。またこれらの技術開発を通じて、将来の原子力開発利用を支える優秀な人材を育成することが求められる。

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：図1）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。

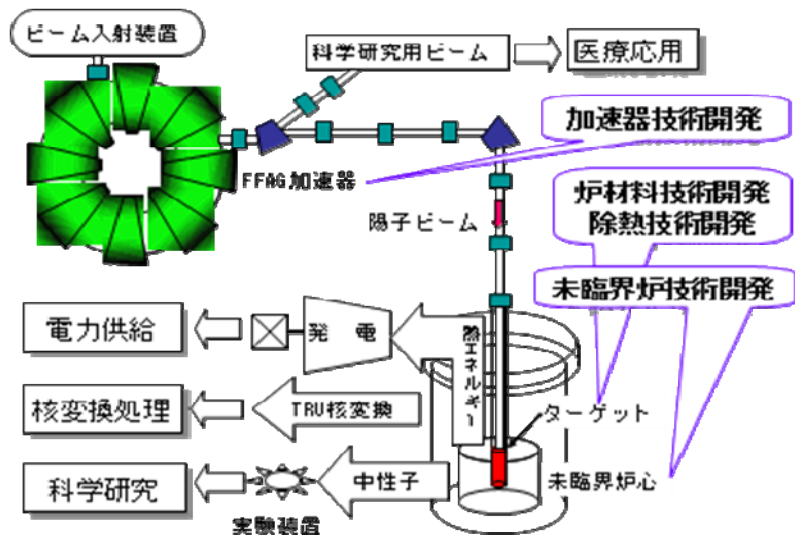


図1 加速器駆動未臨界炉とその開発のために必要な研究。

京都大学原子炉実験所では、平成14年度から20年度まで、文部科学省革新的原子力システム技術開発の研究委託「FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」（研究代表者：三島嘉一郎）を受け、エネルギー可変型固定磁場強集束型（FFAG）陽子加速器を導入し、現有の臨界集合体（KUCA）と結合させ ADSR の中性子増倍特性を調べ、その基本的成立性を評価する研究を行った。この研究は現在も継続しているが、炉材料と除熱関連の研究は含まれていない。従ってこれを補うために、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劣化を引き起こす原因を解明し、除熱技術を向上させることにより、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本研究開発の目的とする。

2. 研究開発成果

2.1 ターゲット材料照射の研究

2.1.1 プロトンビームライン

本プロジェクトに用いる高エネルギー陽子ビームは、FFAG 加速器から供給される。本プロジェクトではより高いビーム強度を実現することが望まれている。そのために、主リングへの新しい入射器として負水素イオンリニアックを用いた荷電交換多重入射方式によるビーム強度の増強を

行った。今年度中にビームラインにビーム集束用の四極電磁石とその電源を設置するための設計が終了し、現在作製中である。

2.1.2 照射チェンバーの設置

新設したプロトンビームラインに設置した照射チェンバーは、各種の実験測定装置が挿入できる構造である。チェンバーは照射中に放射化する。そこで、ステンレス鋼に比べて放射化しにくい物質であるアルミニウムを用いた。アルミニウムは機械的強度が弱いため、削り出しで作製し、かつ肉厚を厚くした。材料の引張試験や疲労試験を行うための機械試験機と照射試料の電気抵抗変化を測定する装置は既に設置した。試料を低温に保持して照射実験を行う低温冷却装置については、試料保持部の設計が終了し作製中である。

2.1.3 オーステナイト系ステンレス鋼照射試験

今回設置した照射チェンバーを用いて材料照射が行われた。陽子ビーム照射時間は10時間、陽子ビーム電流は600pA、ビームの形状は楕円形で、長軸5cm、短軸2cmであった。

オーステナイト系ステンレス鋼の実用合金とそのモデル合金を作製し、照射後陽電子消滅寿命測定を行った。表1に示すように、Au、Niに照射損傷が検出されが、耐照射性が高い実用合金では、検出できなかった。今後は照射量を多くする予定である。

表1 FFAG 加速器において陽子照射された試料の陽電子消滅寿命値。 τ_m ：平均寿命、 τ_1 ：短寿命、 τ_2 ：長寿命、 I_2 ：長寿命の強度。Au、Ni 以外は2成分解析不可能。

試料	τ_m (ps)	τ_1 (ps)	τ_2 (ps)	I_2 (%)
Au	149±1	111±1	292±3	20±1
Ni	107±1	97±2	168±21	10±5
Fe-Cr-Ni	104±1			
Fe-Cr-Ni-Mn-Mo	104±1			
Fe-Cr-Ni-Mn-Mo-Si	103±1			
Fe-Cr-Ni-Mn-Mo-Si-Ti	104±1			
SUS316	107±1			
SUS304	102±1			
Ti 添加改良型 SUS316	104±2			

2.1.4 バナジウム合金照射試験（再委託先：核融合科学研究所）

V-4Cr-4Ti合金、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、高温強度を改善するためにCr量を増加させたV-6Cr-4Ti-0.15Y合金等を作製し、照射前の特性試験を行った。図2は冷間加工後の熱処理による硬さの回復曲線である。何れの試料も間圧延した試料の硬さの回復は600～700℃で開始し、熱処理温度とともに硬さは低下して、900～1000℃で最低値をとった。今後照射実験を遂行する予定である。

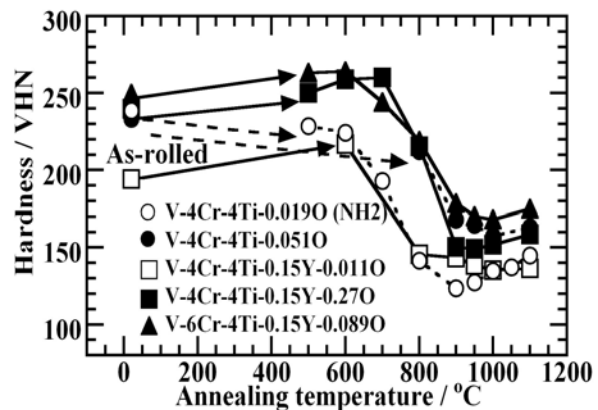


図2 冷間加工後の熱処理による硬さの回復曲線。

2.1.5 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する。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の相関を評価した。

高クロム鋼（Fe-9Cr-1Mo 鋼）を TEM 観察用 3mm 板状試料と SSJ ミニチュアサイズ引張試験片（16x4x0.25mm）に成型加工し、京都大学原子炉実験所の FFAG 加速器を用いて高エネルギー陽子イオン照射を行った。照射条件は 2.1.3 項で述べた条件である。照射後、福井大にて室温引張試験、マイクロビッカース硬さ試験の機械試験を実施した。TEM 観察はレプリカ法により表面析出物の化学組成評価を実施した。

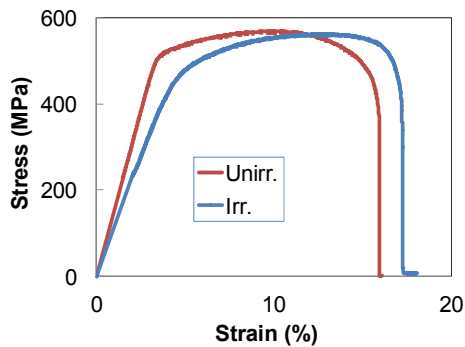


図 3 引張試験の応力歪み線図。

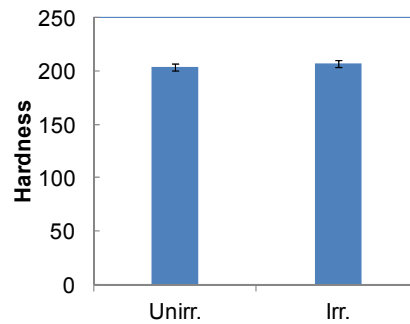


図 4 硬さ試験結果。

図 3 に引張試験結果を、図 4 に硬さ試験結果を示す。照射材及び非照射材の機械的特性には相違がみられた。図 5 にレプリカ法による析出物の TEM 観察写真と観察視野すべての析出物から計測された EDX 分析による化学組成のスペクトル図を示す。この結果からは照射材において析出物の粗大化と Mo の析出物への濃化が示される結果を得たが、今後詳細に検討を行う必要がある。

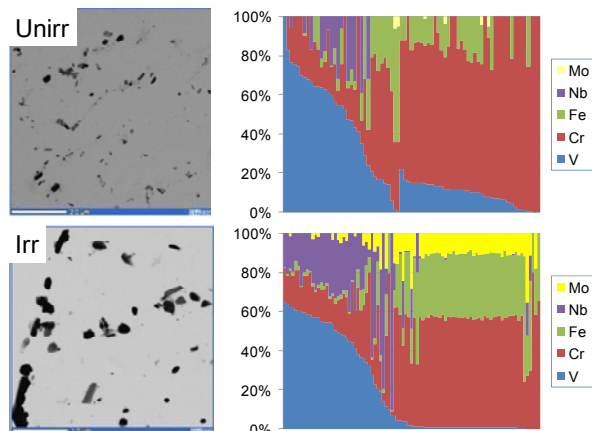


図 5 レプリカ法による析出物組織写真と EDX 分析による析出物化学組成スペクトル結果。

2.1.6 KUCA 内照射試験

中性子束は原子炉の出力や出力分布、中性子スペクトルなどの情報と密接に関係しており、原子炉において非常に重要な物理量である。京都大学臨界集合体実験装置（KUCA）の A 架台の炉心 A3/8” P36EU(3) 炉心において FFAG 加速器からの陽子をタングステンターゲットに衝突させて発生する中性子を用いた ADSR 基礎実験として、反応率測定実験を行った。また同時に試料を張り付けることにより中性子照射実験も行った。陽子の照射量は弱照射の $2.7 \times 10^{11} \text{p/cm}^2$ と強照射の $1.9 \times 10^{12} \text{p/cm}^2$ の 2 種類であった。陽電子消滅寿命測定の結果では、照射量が少なかったため、実用合金では照射欠陥が検出できなかったが、Au では検出できた。今後照射量を増加させて実験を行う予定である。

2.2 除熱技術研究

2.2.1 はじめに

ADSR ターゲット材質には固体金属と液体金属の両方が考えられるが、本研究では両者の開発研究において問題となる熱流動と陽子線照射の影響を実験的に明らかにし、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。本研究では、陽子線照射による濡れ性改善の影響を調べるとともに、濡れ性が沸騰熱伝達に与える影響を実験的に調べた。

2.2.2 熱伝達実験結果

非照射場における熱伝達実験を行い、高質量流束、高サブクールであるほど DNB (Departure of Nucleate Boiling)熱流束、とそれ以降の熱流束は大きくなることが確認できた。また、サブクール度が大きいほど、DNB 点後の過熱度の上昇が小さいことも確認できた。

2.2.3 FFAG 照射実験

照射は FFAG 加速器施設で行った。照射条件は 2.1.3 で述べた。図 6 に酸化膜がある場合の計測例を示す。図の左側が照射後の測定結果、右側が照射後、水につけ 5 時間経った後の測定結果である。写真は省略するが、非照射の場合の金属面の濡れ性は材質によって大きな変化はなく、また真空中での照射前後においては顕著な差は認められなかった。しかし、水につけた後には濡れ性の改善が認められる。過去の研究でも報告されているように RISA 効果が発現するには雰囲気中に水分子あるいは酸素が必要であり、真空中での照射では効果が小さいと考えられる。したがって、水中で静置後の濡れ性改善は放射化による間接的な影響と考えられ、今後、照射中の雰囲気制御が必要である。

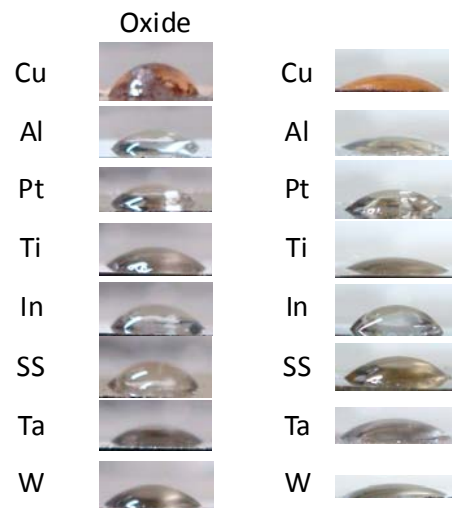


図 6 酸化膜が有る場合の濡れ性の測定結果。

2.2.4 液体金属ループの製作

平成 23 年度中に、液体金属ループが作製される。今後、実験パラメータが基材と液体金属の濡れ性に与える影響を調べる予定である。

3. 今後の展望

平成 23 年度で主な装置は設置される。平成 24 年度は FFAG 加速器のビーム増強に伴って、ビームダンプを設置し、材料照射実験を進行させて予定の研究を終了する。

ターゲット材料照射の研究では、実機に比べて低い陽子照射量での実験ではあるが、照射損傷発達の最初の過程である、格子間原子と原子空孔の生成とその集合過程を解明し、実機材料開発に結び付ける。

除熱技術研究では陽子照射が液体金属実験に与える影響を調べ、固体および液体金属ターゲットの熱流動現象に及ぼす照射の影響を系統的に整理する。