

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

研究代表者 義家 敏正 国立大学法人京都大学原子炉実験所
参画機関 国立大学法人京都大学、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

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、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中心に、上記4つの基礎的研究開発を行うことを目的とした。

2. 研究開発成果

2. 1 プロトンビームラインの整備と照射チェンバーの設置

材料照射研究には照射場が不可欠である。本研究では平成22年度に、FFAG 加速器に材料照射専用の加速器ビームラインと照射チェンバーを設置するために、加速器施設の「承認使用に係る変更申請」を行うとともに、陽子ビームの強度増強のための主リングへの入射機として、負水素イオンリニアックを用いて荷電交換多重入射方式によりビーム強度を増強した。平成23年度には FFAG 加速器にビーム集束装置（図1 四極電磁石）を設置して、材料照射チェンバー内のビーム集束性の向上を行い、従来の10倍のビーム強度を達成した。平成24年度にはビームエネルギーを100MeV から150MeV に増強するとともに、100Hz 以上の高繰り返しビーム加速運転を可能とさせる新高周波加速空洞と半導体高周波増幅器の開発を行い、陽子ビーム電流10nA を可能にする当初の目標とする性能を得た。

材料照射実験に必須の照射チェンバー（図1参照）を平成22年度に導入した。機械試験装置、電気抵抗測定装置や陽電子消滅寿命測定用のシンチレーションカウンターが設置できる。平成23年度には、陽子の低温照射が可能な低温冷凍機を設置した。低温照射中に生成する欠陥による電気抵抗変化や照射後低温での陽電子消滅寿命測定が可能である。

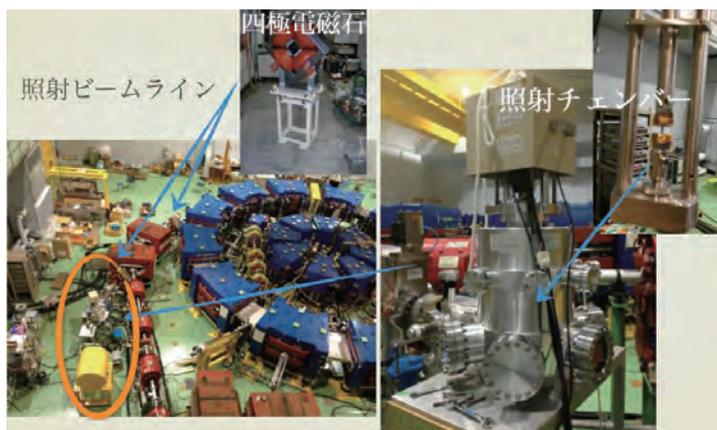


図1 プロトンビームラインと照射チェンバー

2. 2 材料照射試験

高エネルギー陽子を中心に、原子炉、電子ライナック及び核破砕中性子源を用いて、原子力材料として代表的な金属であるオーステナイト系ステンレス鋼、フェライト系ステンレス鋼、V 合金、Al 合金、W の照射損傷を調べた。また、未臨界炉心の照射特性評価も行った。

2. 2. 1 損傷量評価

高エネルギー陽子による材料照射損傷量 (dpa) の計算には、核反応により形成される 2 次粒子による損傷も考慮しなければならず、計算の信頼性については不明である。電気抵抗は欠陥が生成すると増加するので、陽子照射による欠陥の生成量を評価することができる。

材料に入射した陽子のエネルギーは、侵入深さとともに減衰する。エネルギーが高いときは核反応により、低くなればクーロン相互作用による。入射陽子と材料中の原子との核反応による欠陥生成を調べるために、低温照射中の電気抵抗の増加率を Cu 遮蔽板の厚さの関数として測定した。Cu 板が無いときが一番電気抵抗増加率が高く、Cu 板が厚くなるに従って減少した。即ち 150MeV の陽子照射では、入射面に近い方が欠陥の生成率が高かった。核反応計算コード PHITS により計算した、150MeV の陽子照射により生成した 2 次粒子による 1 次弾き出し原子エネルギースペクトルは、ブラックピークまでほぼ一定であり、実験結果の Cu 板が無い時に損傷率が高くなることとは異なる。また陽電子消滅寿命測定でも電気抵抗測定の結果を支持する結果が得られ、照射損傷量を求めるための核反応計算コードの検討の必要性を提言した。

2. 2. 2 バナジウム合金照射試験

バナジウム合金は核融合炉用に開発された材料であり、その使用温度は 450~750°C である。本研究では ADSR への適応性について調べた。ADSR 材料としては、450°C 以下での使用も想定される。そこで、より低温でのバナジウム合金の適用性を検討した。行った実験項目は(1) バナジウム合金試料の作製及び照射前機械特性の評価(平成 22 年度)、(2) 中性子照射後の機械特性の評価(平成 23 年度)、(3) FFAG 加速器照射後の機械特性評価(平成 24 年度、図 2) である。これらの結果、核融合炉条件(100 dpa) よりも低い照射損傷量(5.3dpa 以下) であれば、顕著な照射脆化が無く使用可能であることを示した。また、照射中に酸素等の不純物のピックアップがあると衝撃特性が劣化するので、これを避ける必要があることを指摘できた。

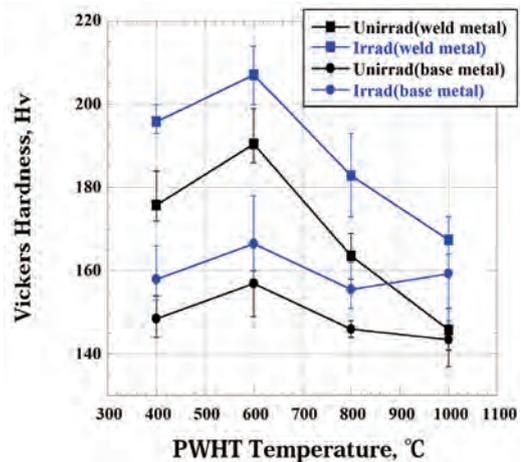


図 2 FFAG 加速器照射前後の母材 (Base metal) と溶接金属 (Weld metal) の硬さ変化

2. 2. 3 フェライト鋼照射試験

フェライト鋼は耐照射性に優れた原子力材料の 1 つである。引張試験結果では 11MeV (673K、 1.4×10^{-2}) 及び 100MeV (室温、 8×10^{-6} dpa) 照射の双方において、引張試験と硬さ試験について非照射材との相違は認められなかった。透過電子顕微鏡観察においても、未照射材と 11MeV 照射材の間で大きな差は認められなかった。これらの結果は予想どおりフェライト鋼の耐照射性が高いことを示した。一方、150MeV での 4×10^{-4} dpa 以上の照射では引張試験による違いが検出された。

2. 2. 4 オーステナイト系ステンレス鋼照射試験

オーステナイト系ステンレス鋼は各種の原子力機器に用いられている重要な材料である。本研

究で照射した試料は、Ni を含むモデル合金 5 種と 3 種の実用合金である。100MeV で 50 時間の照射後欠陥の形成を示したが、合金による差は僅かであった(平成 22 年度)。一方 10^{-3} dpa から 0.1dpa の電子照射や中性子照射では、Cr、Mo-Mn、Si、Ti 及び C のボイドスウェリング抑制効果が検出でき、ボイドスウェリング潜伏期間中の点欠陥過程に関する知見が得られた。

陽子の重照射のデータを取得するために、スイス・ポール・シェラー研究所の核破砕中性子源 SINQ で照射した試料の特性試験を行った。照射後の焼鈍した Ti 添加改良型 SUS316 (JPCA) の陽電子消滅寿命測定結果から、ボイドに He 原子がトラップされ飽和する挙動が検出できた。

2. 2. 5 京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) 内照射試験

ADSR のターゲット材料照射研究を行うために、KUCA と FFAG 陽子加速器を組み合わせ、高速中性子照射場の特性評価のための実験として、中性子エネルギー測定、発生量分布測定、ADSR 内での中性子束測定・反応率測定等を実施した。中性子エネルギー測定については各種の放射化箔法や有機液体シンチレータ測定法を組み合わせ実験手法の確立を含めて実施し、ADSR でこれらの手法を用いることができることを確認した。ADSR 内での中性子束測定・反応率測定については放射化箔法を中心に実施し、詳細な解析計算結果と比較することにより高速中性子照射場の特性に関する予測計算精度を確認することができた。ADSR の中性子照射場の評価として照射箔法や液体シンチレータを用いた方法を組み合わせを行ったが、ともに当初の予想以上に解析結果と一致しており、今後の照射場の特性評価を効率的に行うことができるようになった。これらの成果は、今後の中性子照射場の設計のみならず ADSR の安全設計に役立てることができると考えられる。

2. 3 除熱技術研究 固体ターゲット実験

2. 3. 1 照射による濡れ性の変化

ADSR 固体ターゲットの除熱技術確立を目的として、陽子照射がターゲットや構造材表面の濡れ性及び沸騰挙動への影響を調べるために、線種及び照射雰囲気などのパラメータを変化させて実験を行った。真空雰囲気における γ 線及び陽子照射においては、著しい濡れ性の変化は認められないが(平成 22、23 年度)、水中雰囲気照射では、著しい濡れ性の変化を見いだすことができた(平成 24 年度)。更に、 γ 線及び陽子照射時の光電流計測においては、非照射面上におけるラジカルの発生のみならず、水中における放射線分解が影響していることが判明した。陽子照射時にも γ 線が発生するので、その影響も含まれるが、それ以外の陽子自体の効果については今後の研究課題である。

2. 3. 2 濡れ性が沸騰熱伝達に与える影響

ADSR 固体ターゲットを模擬した試験部の濡れ性を照射により制御し、濡れ性が沸騰挙動に及ぼす影響について実験的に調べた。図 3 に示すように核沸騰領域では沸騰曲線が高過熱度側に遷移し、高過熱度で起きる気泡微細化沸騰領域では核沸騰領域とは逆に低過熱度側へ遷移した。これは、核沸騰領域で

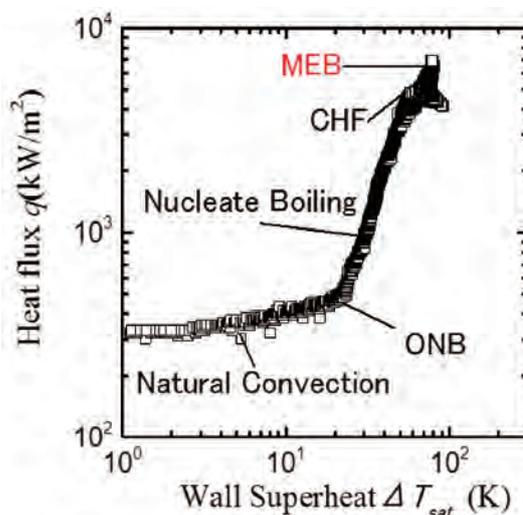


図 3 濡れ性が沸騰曲線に与える影響

は濡れ性の向上により気泡核が不活性化し、気泡微細化沸騰では伝熱面の濡れと乾きを繰り返すため、合体気泡の離脱の後、乾いた伝熱面に冷却水の供給が濡れ性の向上とともに促進されたものと考えられる。線種を変化させて実験を行った例はこれまでになく、紫外線と放射線照射の違いを電圧印加時の光電流計測により明確に示すことができ、今後の放射線誘起表面活性効果のメカニズム解明について、大きな手掛かりを得た。

2. 3. 3 液体金属ターゲット実験

ADSR 液体金属ターゲットを安定に運転するためには、液体金属と構造材との濡れ性を調べる必要がある。しかし、これまでの計測法では、液体金属実験中に濡れ性の変化をオンラインで計測することが不可能であった。液体金属と壁面の濡れ性を考察するために、電磁流速計を用いた計測を行い、液体金属中に気泡が存在する場合のデータを取得し、これまで計測が困難であった低液相流速条件における液体金属二相流の液相速度分布、乱流強度分布が計測可能であることを示した。更に、水-空気系のボイド率と乱流速度との関係を表わした気泡誘起乱流の半実験式との比較を行い、半実験式と本実験の結果がほぼ一致していることを明らかにした。これより、水-空気系の半実験式が液体金属気液二相流にも適用可能であると考えられる。

3. 今後の展望

ADSR では 20MW 以上の陽子ビームが必要とされている。FFAG 加速器は現在 150MeV、10nA であるがパルス時間幅は ~ 20 ns と短く、ピークビーム電流は 0.05A、ピークビームパワーは 7.5MW となり、20MW 達成の見通しがたった。このことは FFAG 加速器の他分野への適応範囲を広げるものである。

KUCA で行った、主に高エネルギー中性子に着目した中性子照射場の特性評価実験は、ADSR だけではなく、高エネルギー中性子を用いた他の実験装置の特性評価や中性子測定技術の開発などにも役立つ。例えば、本研究の成果を生かして大型核融合実験装置で用いる中性子検出器の開発、医療用の中性子照射場の特性評価のための基礎研究、福島第一原子力発電所の安全確保のための中性子検出器の開発等が期待されており、これらの実験的な研究が予定されている。

照射初期における欠陥生成過程を検出するために、材料の特性試験として疲労試験、陽電子消滅寿命測定と電気抵抗測定を行った。何れの実験でも照射欠陥とその特性が検出できた。ADSR 条件での材料照射実験が不可能な現在、材料の陽子や中性子照射挙動を解明し、ADSR 条件へ外挿しなければならない。そのためにも低照射量でのデータが重要である。今回開発した損傷初期の材料照射効果を検出する手法は、一般的な照射損傷研究に用いることができる。また、11MeV 及び 100-150MeV までの高エネルギー陽子照射場として、ADSR 以外にも核融合中性子模擬照射場としての利用や照射による材料改質などの利用が期待される。

照射による濡れ性制御は原子力基盤においては、熔融デブリなどの濡れ性評価や再冠水時における沸騰熱伝達評価に重要であるばかりでなく、宇宙開発における熱伝達機器に与える宇宙線の効果を見積もる上でも極めて興味深い課題であり、今後、本研究の計測手法を基礎として広く研究が行われる可能性が高い。

本事業で導入した殆どの装置は、全国共同利用施設である原子炉実験所のホット施設内に設置された。従って、従来から使用されている各種の機器と補完して利用されるため、ホット施設の活用度の上昇が期待される。