

日本原子力研究所 高崎研究所 放射線高度利用センター・ビーム技術開発室

日本原子力研究所高崎研究所
放射線高度利用センター・ビーム技術開発室

岡田漱平

e-mail: bazooka@taka. jaeri. go. jp

1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所（以下、原研高崎）では、AVFサイクロトロン、3 MV タンデム加速器、3 MV シングルエンド加速器及び400 kV イオン注入装置の4台のイオン加速器を使い、宇宙環境材料、核融合炉材料、新機能材料及びバイオ技術の研究を中心とした放射線高度利用研究を進めている。当研究室では、これら加速器群ユーザーの多様なニーズに応えるべく、マイクロビーム技術、イオン源技術及びサイクロトロン加速器技術の開発を進めている。これには、7名の若手職員と1名の業務協力員があたっている。また、これら材料・バイオ研究を進める上で不可欠な共通基盤となる線量計測技術の開発に2名の職員があたっている。

原研高崎では、100 MeV、100 kW級の高出力電子リニアックを用いて高強度の低速（単色）陽電子ビーム（ 10^{10} 個/秒以上）を発生させ、イオンビームとの複合利用を進めることによって、材料・バイオ研究のさらなる展開を図るとともに、反粒子ビーム利用という科学の新領域を開拓することを目的としたポジトロン利用研究施設の実現を目指している。当研究室では、照射施設管理課と協力して設計を進めるとともに、実現に必要な要素技術の開発を行っている。また、陽電子ビーム技術開発及びイオン・ポジトロン複合利用を視野に入れたポジトロン利用研究を先行的に進めている。これには、室長を含め2名の職員と1名の業務協力員及び2名の外来研究員があたっている。

本稿では、以上の研究開発で、ここ数年間に行ってきた仕事を紹介させていただく。

2. イオンビーム技術開発

宇宙用半導体デバイスの開発では、宇宙線陽子がデバイスの局所領域に及ぼす影響を調べる必要がある。これに応えるため、軽イオンマイクロビーム形成技術の開発を進め、ビームサイズ0.2~0.3 μ mの世界最高レベルの集束性能を達成した。このビームの応用として、マイクロPIXEの予備実験を行い、サブミクロンサイズでの血液等の微量元素2次元マッピングが可能であることを確認した。ただし、ビーム損傷を抑える

ためには、微小電流での短時間測定を可能にする高感度高速計測システムの整備が必要である。また、重イオン宇宙線が半導体メモリーを反転させてしまうシングルイベント現象の解明のため、ミクロンレベルで位置決めして1個1個重イオンを照射する重イオン照準技術及びシングルイオンヒット技術を確立した。

放射線高度利用研究の進展に伴い、イオン種と加速エネルギーに対する要求も多様化してきている。このため、サイクロトロンで多価金属イオンを加速するためのECRイオン源、静電加速器の加速エネルギー範囲を拡大するための小型ECRイオン源及びタンデム加速器を用いた分子・クラスターイオン加速技術の開発を行い、実用化の目途を立てた。また、SF₆プラズマによるフッ化反応を利用したイオン化法を発見し、小型ECRイオン源で、タンタル、タングステン等の重金属イオンを、純金属試料から実用強度で発生させることに成功した。

宇宙用半導体や細胞の損傷の研究では、イオン種と打ち込みエネルギーを変えて、物質に与えるエネルギーが異なる膨大なデータをとる必要がある。このため、サイクロトロンで、質量(M)と荷電(Q)の比に近い値をもつイオン種を簡単な操作で短時間のうちに次々と変えて加速できるカクテルビーム加速技術の開発を進め実用化した。また、迅速かつ確実なサイクロトロン運転を可能にするため、制御システムへの高速のフィードバックが可能かつサイクロトロン各セクターでの粒子のふるまいと物理的に対応した粒子軌道計算コードを開発した。さらに、ビームパルス時間構造計測用のトリガーカウンターを開発し、実用化の目途を立てるとともに、スパイラルスキャン方式による新しい均一拡大照射技術を開発した。

加速器施設の放射線データ整備においては、原研・大学プロジェクト共同研究の一環として、準単色中性子場の整備を行い、加速器構造材の中性子放射化断面積測定や迷路内漏洩線の測定等を進め、データのまとめに入った。また、施設利用における放射線安全及びビーム利用データ取得のためのコードを開発・整備した。

(以上、図1)

3. 線量計測技術の開発

イオンビーム吸収線量計測については、ビーム強度の不安定さ及び強度分布の影響を最小限とするため、5-20MeV/amuの走査イオンビームの均一フルエンス照射場で、フルエンス情報を与える電荷計測及びそれと粒子エネルギーの積を与える熱量計測、簡便かつ分布測定に応用できるフィルム線量計の同時照射・測定法を用いて研究開発を行った。電荷及び熱量の測定結果から粒子エネルギー公称値を基にフルエンス測定精度を評価した結果、高分子材料研究等で用いる電流域(>数10nA/cm²)では、今後正確なLET特性を明らかにするフィルム線量計を用いることにより±5%以内の不確かさで線量測定が可

能である見通しが得られた。また、積層したフィルム線量計を用いた試料内の深度線量分布の実測及びその計算との比較を行った。

アラニン線量計をトランスファー線量計として用いた γ 線量相互比較により、原研標準が国際的標準と $\pm 2\%$ 以内で整合すること及び原研における校正用 γ 線照射場と電離箱システムに基づく線量測定の手順を再検討し不確かさが $\pm 2\%$ であることを明らかにした。また、基準線量計としてアラニン線量計の応用拡大のため、材料試験用低 γ 線量率環境及び放射線治療線量域($<100\text{Gy}$)等への応用実効性と精度評価を行った。

(以上、図1)

4. 陽電子ビーム技術開発及び陽電子利用研究

高エネルギー電子を高エネルギーの陽電子及び光子に変換するコンバータは、高出力電子ビームによる熱と放射線に耐える必要があるため、放射線劣化のおそれのあるモーター等を使用せず、冷却水を駆動力及び軸受け潤滑材として利用する自走式回転コンバータを独自に開発し、電子ビーム照射試験、長時間動作試験及び有限要素法による熱解析により実用性を確認した。

高エネルギーの陽電子を減速し、低速陽電子が表面から自発的に放出される現象(再放出)を利用して単色陽電子ビームをつくるモデレータとしては、通常タンゲステン箔を並べたアセンブリが用いられるが、モデレータアセンブリを複数個配置し、同時に複数のビームラインに単色陽電子ビームを供給する多チャンネル単色陽電子ビーム同時形成法をモンテカルロ計算に基づき提案し、電子リニアックを用いた実験によりその可能性を実証した。また、この実験結果に示唆を受け、モデレータアセンブリを反射材で囲まれたハニカム構造とすることにより通常の3倍以上の低速陽電子収率が得られることを見出した。

また、ターゲット部(コンバータ・モデレータ)周囲の放射線レベルを2桁低減させ、すでに安全に運転がなされている既存の1kW級電子リニアック施設なみとするための特殊な局所遮蔽構造を考案し、以上を照射施設管理課が進めたポジトロン利用研究施設概念検討に反映させた。

さらに、原子力基盤クロスオーバー研究の一環として、融点直下の高温や繰り返し応力下など極端条件下での欠陥生成過程の研究を可能にするエネルギー1MeV、パルス幅100ps以下の高速短パルス陽電子ビーム形成装置を完成させるとともに、静電場輸送型低速陽電子ビームラインを完成させ、サブミクロンビーム形成に必要な輝度強化実験及び反射高速陽電子線回折(RHEPD)の予備実験に着手した。(以上、図2)イオン・ポジトロン複合利用を視野に入れた陽電子ビーム利用計測系の検討の一環として、材料開発部との協力を中心とした先行的研究を進めた。産業・物性研究の両面から

注目されている半導体中の水素の挙動について、シリコン (Si) に水素イオン注入を行い陽電子寿命測定を行った結果を、電子線照射及びヘリウムイオン注入の結果と比較し、化学的に活性な水素は高温で原子空孔と安定な結合状態をつくることを明らかにした。また、電子線照射したSiの低温における陽電子寿命測定の結果から、これまで温度依存性を持たないとされてきたSi中の電氣的に中性な原子空孔への陽電子捕獲率が、共鳴捕獲現象として説明可能な極大点をとる温度依存性を持つことを明らかにした。さらに、宇宙用耐環境性半導体として原研が開発を進めている炭化ケイ素 (SiC) に電子線照射を行い、欠陥のあるまいを陽電子寿命測定により調べた結果、これまでESR測定で見出されていたT1シグナルと呼ばれる不対電子の信号が、Si空孔 (Si原子の抜けた孔) に由来するものであることを明らかにした。また、同じくIV族半導体で、互いに任意の割合で溶け合うことからバンドギャップ制御可能性が注目されているSi-Ge合金の組成比と陽電子寿命との相関において、格子定数の変化から予想される陽電子寿命変化からはずれる特異点が存在することを見出した。(以上、図3)

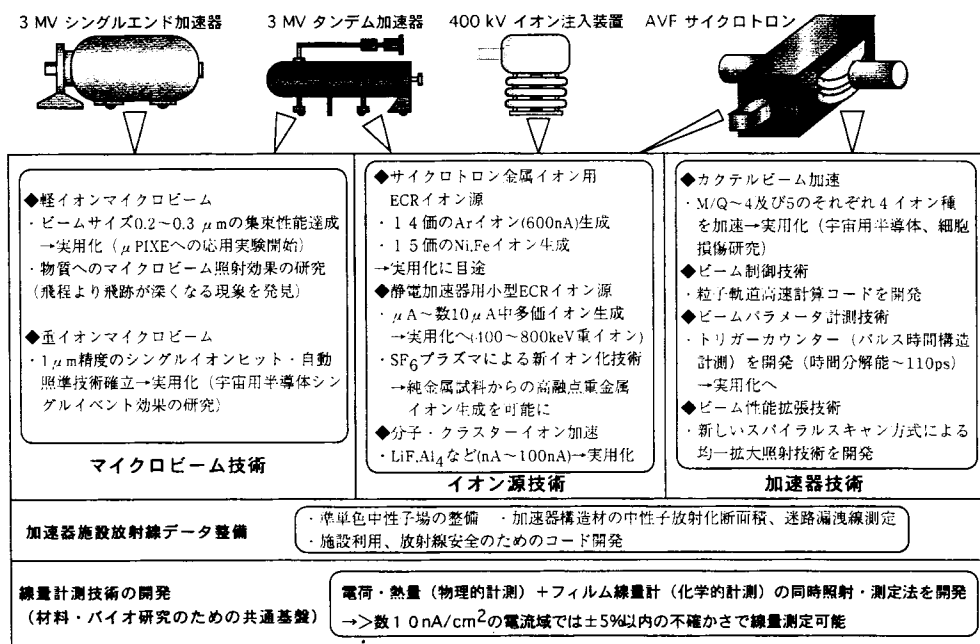
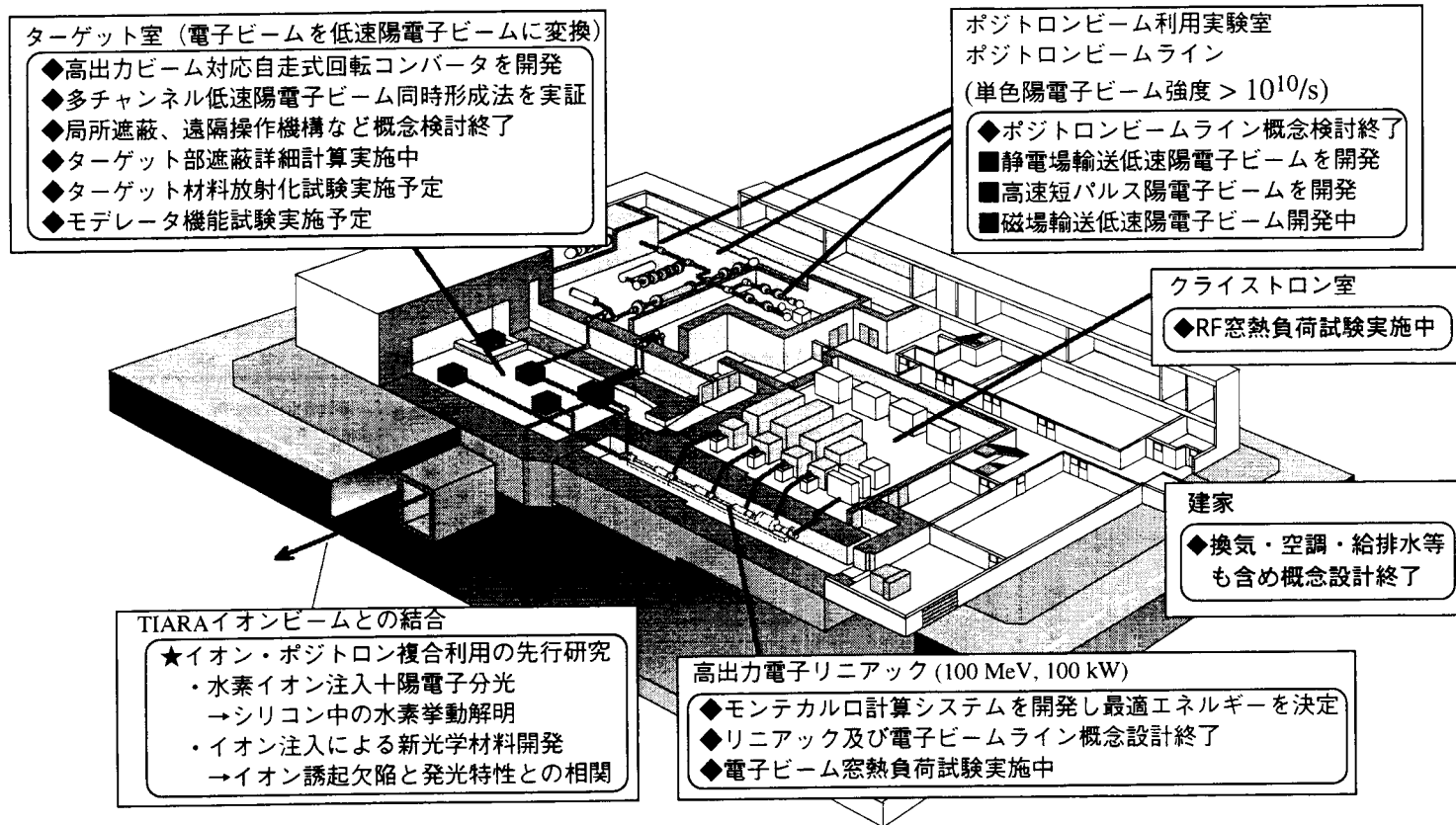


図1 イオンビーム技術開発及び線量計測技術開発



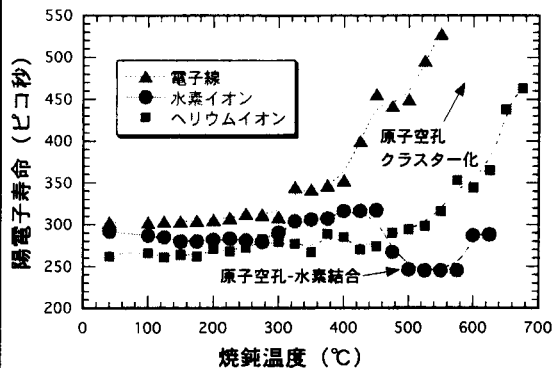
内：◆設計・要素技術開発、■ビーム技術開発、★先行研究

図2 ポジトロン利用研究施設の概念と設計・要素技術開発及び陽電子ビーム技術開発

Si 中の水素挙動の研究

不可避免的に導入される水素：産業・物性研究
両面から注目

水素は高温で原子空孔と結合状態をつくる
ことを見出した

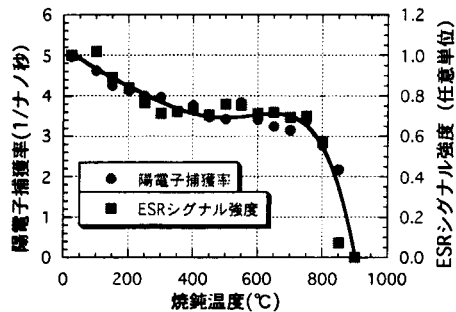


3MeV電子線、6MeV水素及びヘリウムイオン
を照射したSi 中の陽電子寿命

SiCの照射欠陥の研究

SiC：耐放射線性半導体として注目

ESRで見出された欠陥がSi原子の抜けた
原子空孔であることを明らかにした

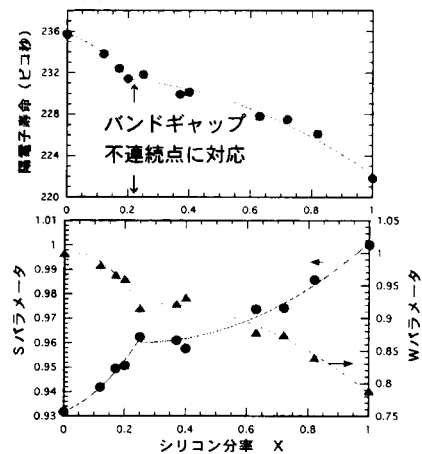


3MeV電子線照射したSiC中の陽電子
捕獲率及びESRのT1信号強度

SiGe中の原子空孔の研究

SiGe：全率固溶合金（バンドギャップ
制御可能）として注目

原子空孔が電子的特性と相関を持つこと
を見出した



SiGeの元素固溶比と陽電子寿命及び
消滅 γ 線エネルギースペクトルのSパ
ラメータ（外殻電子成分）・Wパラメ
ータ（内殻電子成分）

図3 陽電子利用先行研究