

話 題

RI ビーム照射を用いた摩耗試験

神原 正*

Wear Diagnostics of Machine Parts with RI-Beam Implantation

Tadashi KAMBARA *

Abstract

Radioactive tracers with life times from several weeks to a few years are applicable for wear diagnostics of machine parts. We are developing a radioactive-ion (RI) beam implantation method for this purpose using ^7Be and ^{22}Na from an in-flight RI beam separator CRIB at RIKEN. According to beam studies, we had enough RI-beam intensity and implantation depth for wear diagnostics and the depth profile was reproduced by calculations with measured energy distribution of the RI beams and SRIM calculation for the energy degraders.

1. はじめに

理化学研究所仁科加速器研究センターでは、2009年から重イオン加速器施設 RI Beam Factory (RIBF)¹⁾の一部を民間企業等に有償提供することを目的とした RIBF 施設共用促進事業を行っている。本稿では本事業の概要と、RI ビームの利用例として産業用機械部品の摩耗試験技術開発について紹介する。

2. 事業の概要

RIBF は原子核物理・物性物理・生物・化学などの研究を目的として建設された重イオン加速器複合施設で、すべての元素のイオンを数 100 MeV/核子まで加速して、大強度の重イオンビームを供給するのみならず、付設の RI ビーム生成分離装置により核種を選別した高速の不安定核ビーム (RI ビーム) を二次ビームとして生成できるという世界有数の施設である。RIBF のうち旧施設すなわち 1980 年代に完成した重イオン線形加速器 (RILAC)・AVF サイクロトロン・リングサイクロトロン (RRC) は、水素からウランにわたる元素のイオンを最大 100 MeV/核子程度まで加速できるだけでなく、比較的軽い元素の RI ビームを生成できる。また 20 年以上にわたる

運転経験と、原子核物理のみならず様々な分野の研究実績がある。

RIBF 施設共用促進事業が目指すのはこの旧施設を従来の学術研究に加えて国内の民間企業等による利用、特に RIBF の特長を活かした利用に提供することである。事業の詳細、課題申請の手順、利用料金および今までの実績については web page[†]をご参照頂きたい。なお RIBF では長年にわたり重イオンビームによる植物育種²⁾で多大な実績を挙げているが、これはここで紹介する事業には含まない。以下では RI ビーム利用の例として機械部品の摩耗試験を紹介する。

3. RI による摩耗試験

機械の安全・安定な運用には、部品間の摺動による摩擦・摩耗がきわめて重要であるが、その物理・化学的な素過程は複雑多岐にわたり、様々な環境・運転条件に支配される。これを包括的に説明する理論体系はまだ存在せず、試験片などによる測定結果を実機に適用するにも大きな不確定性がある。そのため、特に新しい材料や加工法を導入する場合、実機の運用による事故や障害を防ぐため、事前に実物の部品、さらには実機による試験を行うことが重要である。

摩耗試験では目的に応じて様々な測定方法が組

* 理化学研究所仁科加速器研究センター RIKEN Nishina Center
(E-mail: kambara@ribf.riken.jp)

† <http://ribf.riken.jp/sisetu-kyoyo/>

み合わされるが、その1つに放射性同位体を用いる方法(RIトレーサー法)がある。予め部品の摺動部分を放射化して、機器を運転しながら外部に設置した検出器で γ 線を計測すれば、部品中の残留RI量を定量できる。摩耗が進行して部品からRIが離脱すると計数率は減少する。また部品が潤滑液中にある場合は、別の方法として、潤滑液を循環させてそれに混入するRI量を検出器で測定すれば相補的な情報が得られる。部品の放射能変化をRI核種の半減期で補正し、予め測定しておいたRI濃度の深さ分布で換算すれば、摩耗深さの時間変化に焼直することができる。一般にRIトレーサーによる測定は非常に高感度で、また γ 線が物質を透過しやすいので、容器中にあるRIの挙動を外部から追跡できる。また γ 線のエネルギーはRI核種に特有なので識別が容易で、測定環境によるバックグラウンドの影響を受けにくい。したがってRIトレーサー法では機器を運転しながら非接触、リアルタイムかつ高感度で摩耗の状況を知ることが可能で、同じ機器に対して運転条件や環境を変えながら試験をするのに適している。

摩耗量の限界感度は計数率変化の統計精度で決まる。例えば、表面から約 $10\ \mu\text{m}$ までを約 $100\ \text{kBq}$ で放射化して検出効率が約1%の検出器で約10分毎に測定した場合、数 $10\ \text{nm}$ 程度までの摩耗量が検知できる。

放射化の方法として、多くの場合は軽イオン加速器による照射で材料を放射化する薄層放射化(TLA)法^{3,4)}が行われているが、材料中の核反応に依存するのでその構成元素により検査に適するRIが生成できないことがある。また必要量のRIを核反応で生成するには大きな照射量を必要とするので、放射線損傷で材料が劣化する可能性がある。それに対して、検査に用いるRIを外部で生成してビームとして検査部位に直接打込めば、材料中の核反応に依存しないので部品の構成元素にかかわらずより広範かつ高度な摩耗検査に応用できる。また必要な個数のRIのみを直接注入するので材料の損傷が低減できる⁵⁾。

一般に摩耗試験には日から月単位の期間を要し、その対象部品は密閉されていることが多い。したがって数日以上半減期で適当なエネルギーの γ 線を放出するRI核種のビームを作り、測定に必要な数 $100\ \text{kBq}$ 以上を部品表面から深さ数

$10\ \mu\text{m}$ の範囲に利用者が希望する深さ分布で計画的に注入する必要がある。さらに、民間企業がこれを有償で利用するには利用料金で折り合えなければならない。

理研RIBFの最強の特技は二次ビームとしてのRIビーム生成である。安定核種の高速重イオンが標的を通過するとその一部が原子核反応でほぼ同速度のRI核種に変換される。それを電磁的に選別すると核種とエネルギーをそろえたRIビームを得ることができる。RIBFにはこれを目的とするインフライト型のRIビーム生成分離装置が新施設のBigRIPS⁶⁾と旧施設のRIPS⁷⁾、CRIB⁸⁾の3台あり、主として原子核物理の実験に使用されているが、このうちRIPSとCRIBは共用促進事業にも使用されている⁹⁾。以下ではCRIBを用いて行ったRIトレーサー注入を紹介する。

4. CRIBによるRIビーム注入試験

4.1 装置概要

CRIBは東京大学原子核科学研究センター(CNS)が設置したRIビーム生成分離装置で、AVFサイクロトロン¹⁰⁾の重イオンビームから $10\ \text{MeV}$ /核子程度までのRIビームを生成して実験に提供する。CRIBで得られるRIビームは飛程が摩耗試験に必要な注入深さに適合し、またRIBFでは最も小さい加速器AVFサイクロトロンを使用するので利用料金が安いというメリットがある。摩耗試験では注入されるRIの量と深さ分布が重要である。本試験の目的は有償利用に先立ちそれを制御、評価する技術を確認することである。

AVFサイクロトロンで加速されるイオンは比較的軽い元素に限定され、さらに前章で述べた半減期・強度・注入深さの条件があるので、摩耗試験に利用できる核種は ^7Be と ^{22}Na に限定される。 ^7Be は半減期53日で電子捕獲壊変して分岐比10%で $477.6\ \text{keV}$ の γ 線を放出する。また ^{22}Na は半減期2.6年で β^+ 壊変して消滅 γ 線を出し、さらにほぼ100%の分岐比で $1275\ \text{keV}$ の γ 線を放出する。この2核種のビームを摩耗試験に供するための技術開発として、深さ分布を制御して試料に注入し、 γ 線計測でその分布を測定した。

図1にCRIBの構成を示す。AVFサイクロトロンからの安定核ビーム(一次ビーム)を液体窒素で冷却された水素ガスの一次標的¹⁰⁾に当て、

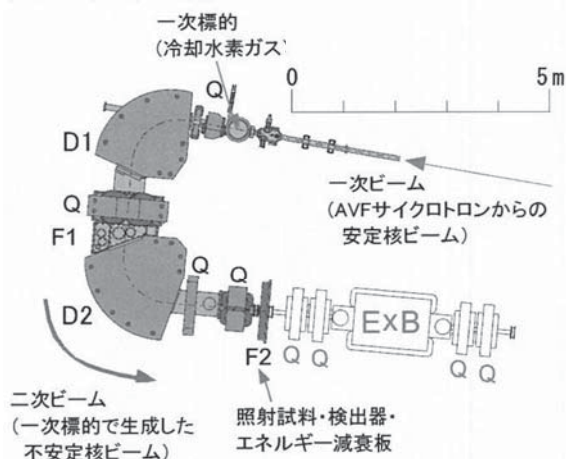


図1 摩耗試験用 RI 注入に使用した CRIB の構成

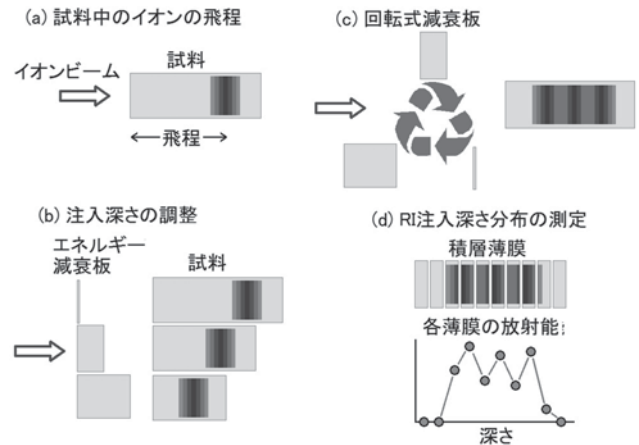


図2 RI ビーム注入の深さ分布の調整と測定の様式図

ビームの方向に出る核反応生成イオンを D1 電磁石で運動量分散して F1 に集束する。ここでスリットにより核種とその運動量分布を選別して、目的核種の RI ビームを D2 電磁石と Q 電磁石で F2 焦点面に集束する。F1 スリット幅は二次ビームのエネルギー幅すなわち注入される RI の深さ分布を決める重要なパラメータである。

F2 焦点には新たに RI ビーム注入専用の真空箱を設置した。そこには RI を注入する機械部品等の試料のほかに注入深さ分布を設定するためのエネルギー減衰板、RI ビームの形状とエネルギー分布を測定するための 2 次元位置計測型半導体粒子検出器 (PSD) および蛍光板があり、それぞれ遠隔操作でビーム経路上に出し入れすることができる。

4.2 RI 注入深さ分布の調整と測定

RI ビームの注入深さ分布を調整する方法の様式図を図 2 に示す。(a) のように試料中のビーム注入深さはイオンの種類とエネルギーで決まる飛程を中心に分布する。(b) のように試料の前にエネルギー減衰板を置くとその厚さに応じて注入深さが変わる。(c) のように減衰板を回転台に取り付けてビームを順次通過させてエネルギー損失を変えると、注入深さ分布は各減衰板による深さ分布の重ね合わせになる。RI ビームの注入深さ分布の測定には (d) のように積層した薄膜に注入したのち各薄膜の放射能を計測する。

今回の試験では、回転式減衰板として直径 14 cm で 1 分間に 12 回転する円盤上の 8 か所のホルダーに厚さの異なるアルミ薄膜を取り付けて、ビームを薄膜に順次通過させた。また必要に応じて回転式減衰板と試料の間に固定式減衰板と

して別の薄膜を設置した。

注入された RI の深さ分布評価のため、厚さ約 2 μm のアルミ薄膜を最大 25 枚まで積層して試料位置で同じ条件のビームを注入したのち、ゲルマニウム検出器による γ 線測定で各薄膜の放射能を得た。以下でその測定結果と計算との比較を示す。

4.3 ^7Be 注入

^7Be ビームは、5.7 MeV/核子の $^7\text{Li}^{2+}$ ビームと標的水素の H ($^7\text{Li}, ^7\text{Be}$) n 反応で生成した。一次ビームの平均強度は約 1.7 p μA で、標的は圧力が約 760 Torr で温度が 90 K、F2 に集束された ^7Be ビームの大きさは 4.8 mm \times 8.1 mm であった。注入後の放射能測定結果から求めた RI 注入速度は約 60 kBq/h で、 ^7Be のビーム強度 $10^8/\text{s}$ に相当する。PSD で測定した ^7Be のエネルギーは約 4.1 MeV/核子で、核反応の運動学に標的によるエネルギー損失を取り入れた計算値によく一致する。また F1 スリット幅 50 mm でエネルギー半値幅は 0.4 MeV/核子であった。回転式減衰板のホルダー 8 個のうち 7 個に厚さ 5 μm から 35 μm まで約 5 μm 等間隔のアルミ薄膜を取り付けて 1 個は空白として、さらに厚さ 12 μm のアルミ薄膜を固定式減衰板に用いた。

図 3 に注入された ^7Be の深さ分布 (相対値) を示す。図中●は積層薄膜の放射能測定による約 2 μm 間隔ごとの深さ分布の平均値を示す。また点線はエネルギー減衰板なしで PSD で測定した ^7Be のエネルギー分布から SRIM で計算した飛程分布 (右端) とそれから各減衰板の厚さを差し引いた深さ分布で、実線はその合計である。さらに□はそれを各積層薄膜の厚さ範囲で積分した結果

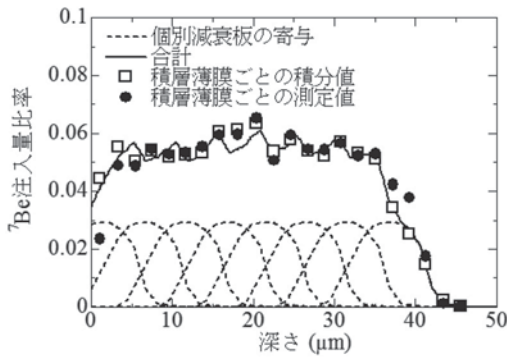


図3 Al 積層薄膜中の ^7Be の注入深さ分布

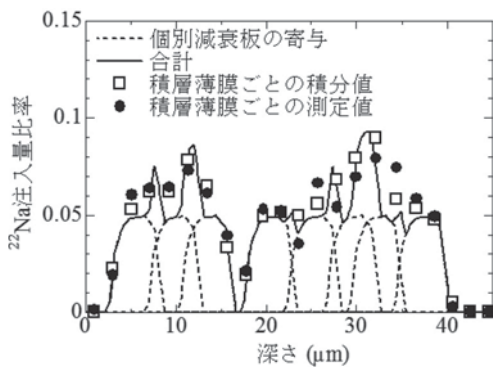


図4 Al 積層薄膜中の ^{22}Na の注入深さ分布

である。深さ $5\ \mu\text{m}$ 以下の表面近くを除けば $35\ \mu\text{m}$ 以内では実測値と計算値がほぼ一致し、 $\pm 10\%$ 以内で一様である。表面近くで注入量が少ない原因は減衰板による散乱と考えられる。

4.4 ^{22}Na 注入

^{22}Na ビームは、 $6.1\ \text{MeV/核子}$ の $^{22}\text{Ne}^{7+}$ ビームによる $\text{H}(^{22}\text{Ne}, ^{22}\text{Na})\text{n}$ 反応で生成した。一次ビームの平均強度は約 $0.25\ \mu\text{A}$ で、標的は圧力が約 $400\ \text{Torr}$ で温度が $90\ \text{K}$ の水素ガスである。F2 に集束した ^{22}Na ビームの大きさは $4.7\ \text{mm} \times 4.3\ \text{mm}$ であった。RI 注入速度は約 $0.3\ \text{kBq/h}$ で、 ^{22}Na のビーム強度 $10^7/\text{s}$ に相当する。F1 スリット幅 $50\ \text{mm}$ で測定した ^{22}Na のエネルギーは中心値が約 $3.7\ \text{MeV/核子}$ 、半値幅が $0.4\ \text{MeV/核子}$ であった。回転式減衰板のホルダーには厚さ $5\ \mu\text{m}$ から $32\ \mu\text{m}$ まで7枚のアルミ薄膜を取り付けた。厚さは不等間隔とした。

図4に注入された ^{22}Na の深さ分布を示す。表記は ^7Be と同様で、●と□は $2\ \mu\text{m}$ 間隔の平均値である。減衰板の厚さが不等間隔なので深さ分布は一様にならないが、SRIMによる計算は測定値をよく再現する。ただし深さ分布に尖塔状の構造が見られるが、これは ^{22}Na のエネルギー分布の

形状が ^7Be に比べて台形に近く、隣接する厚さの減衰板による RI 分布が重なるためと考えられる。深さ分布を一様にするには事前に減衰板の厚さを適切に選択するとともに、ビーム調整中に F2 でエネルギー分布を測定しながら F1 スリット幅を最適化する必要がある。ただし深さ分布が平滑でなくとも正しく実測できるなら、精度の良い摩耗検査が可能である。

5. ま と め

RI ビームを機械部品の摩耗試験に利用する技術開発のため、理研仁科センターにある東大 CNS の RI ビーム生成分離装置 CRIB で ^7Be と ^{22}Na の注入試験を行った。その結果、摩耗試験に必要な量の RI 注入が可能で、またその注入深さ分布の測定値が計算で良く再現できることを確認した。実際の利用時には、あらかじめエネルギー減衰板の厚さの組み合わせを選択し、さらにビーム調整時に RI ビームのエネルギー分布測定と F1 スリットの調整で、利用者が希望する RI 注入深さ分布を実現するめどが付いた。

この試験は理研、東京大学原子核科学センター、住重試験検査株式会社、住友重機械工業株式会社の共同で行った。著者は理研の吉田敦氏、竹市博臣氏、東大の山口英斉氏、中尾太郎氏、David Kahl 氏、住重試験検査(株)の上本龍二氏、住友重機械工業(株)の高橋伸明氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) H. Okuno, N. Fukunishi, and O. Kamigaito: Prog. Theor. Exp. Phys. 03C002 (2012).
- 2) 阿部知子, 平野智也, 風間裕介: 日本物理学会誌 67, 680 (2012).
- 3) T. Kosako and K. Nishimura: Nucl. Instrum. Methods B40/41, 587 (1989).
- 4) 山本匡吾, 畠山典子: RADIOISOTOPES, 45, 700 (1996).
- 5) 吉田 敦, 神原 正, 上本龍二: 月刊トライボロジー No. 324, 16 (2014).
- 6) T. Kubo: Nucl. Instrum. Methods B 204, 97 (2003).
- 7) T. Kubo et al.: Nucl. Instrum. Methods B70, 309 (1992).
- 8) Y. Yanagisawa et al.: Nucl. Instrum. Methods A 539, 74 (2005).
- 9) A. Yoshida et al.: Nucl. Instrum. Methods B 317, 785 (2013).
- 10) H. Yamaguchi et al.: Nucl. Instrum. Methods A 589, 150 (2008).