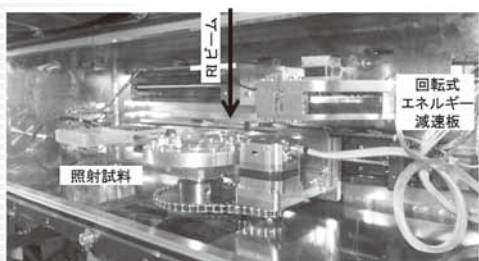


RIビーム打込み法を用いた摩耗検査法の開発



機械部品を真空チェンバー中で回転させながらRIビーム法で放射化する

吉田 敦*

(独)理化学研究所 仁科加速器研究センター
共用促進・産業連携部 産業連携チーム リーダー

神原 正

同 共用促進・産業連携部

上本 龍二

住重試験検査(株)開発部プロセス開発Gr. GL代理

1. はじめに

機械部品の摺動部の摩耗検査を定量的に評価するために、放射性同位体Radio Isotope (RI) をトレーサーとして用いる手法がある。たとえば自動車エンジンなどの摩耗耐久試験では、通常は初期計量→組立→運転→分解洗浄→摩耗計量という工程を繰り返すが、評価したい運転条件ごとにこれらの工程を繰り返すには時間が掛かり、また測定の実現性を確保するのも困難である。そこで、稼働している装置の摩耗の進行状況を外部からリアルタイムで診断する手段として、RIトレーサーが昔から用いられてきた。近年、加速器技術の進歩により、RIをビームとして検査部位に直接打ち込むことが可能になってきた。このRIビーム打込み法によって、より高度な摩耗検査への応用が可能と思われるので紹介したい。

2. RIビーム打込み法の特徴

2-1 RIトレーサーで摩耗量を検出

装置内部の摩耗をリアルタイム診断するには、たとえば図1に示すように検査対象部品の表面を予めRIトレーサーで放射化しておく。RI原子核から放出される

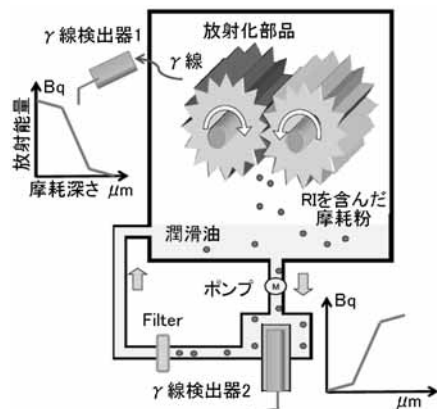


図1 RIトレーサーを用いた、装置内部のリアルタイム摩耗量測定

γ線は物質の透過率が高いため、装置外部に設置したγ線検出器1で計測すればRI残留量を測定できる。摩耗が進行して摩耗粉となってRIが剥がれ落ちると、検出器1の計数率は減少する。一方検出器2を用いて、潤滑油に混入するRIの増加量を相補的に測定する。これらの計数率変化にRI核種の半減期補正を行い、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き直せる。

RIトレーサーによる測定は、非常に高感度である。放出γ線はRI核種に特有のエネルギーを持ち識別が容易なので、測定環境によるバックグラウンドの影響を受けにくい。摩耗量の限界感度は計数率変化の統計精度で決まる。たとえば、表面から約10μmまでを約100kBq (Bqは、1秒間の崩壊数)で放射化して検出効率(約



部品組成	⁵⁶ Fe	²⁷ Al	⁶⁵ Cu	⁵² Cr	⁴⁸ Ti	¹²⁰ Sn
生成RI	⁵⁶ Co	²² Na	⁶⁵ Zn	⁵¹ Cr	⁴⁸ V	^{120m} Sb
半減期	78.8d	2.6y	244.1d	27.7d	16.0d	5.8d

図2 直接放射化法で生成可能なRI核種とその半減期。陽子、重水素、³He (E=10~20MeV)ビームを金属部品に照射した場合 (提供:住重試験検査)

1%)の検出器で約10分ごとの測定を行った場合、数10nm程度の摩耗量まで検知できる。

2-2 従来の直接放射化法

微量の摩耗を診断するには、部品表面のみが高濃度で放射化されることが望ましい。1970年代頃から薄層放射化(TLA)法の研究が軽イオン加速器を用いて行われ、摩耗検査に利用されてきた^{1), 2)}。たとえばFe、Al、Cuなどの元素を主成分とする金属材料を陽子ビームなどで直接照射すると、原子核反応により摩耗計測に有用な数ヶ月~数年程度の長半減期RIを生成できる(直接放射化法:図2)。ところが、H、C、N、Oなどを主成分とする樹脂系では、数秒~数十分程度の短半減期RIしか生成できない。そのため従来法は金属系素材に限られた。また合金などでは、γ線検出の妨害核種も生成される場合もあった。さらにRI濃度を高めるには大強度ビームの照射が必要で、部品表

*【著者問合せ先】

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1
Tel.048-467-9423 Fax.048-461-5301
E-mail ayoshida@ribf.riken.jp
URL http://ribf.riken.jp/sisetu-kyoyo/

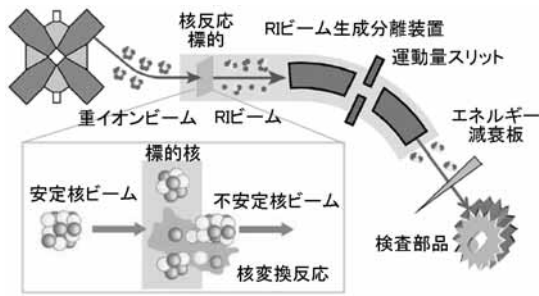


図3 RIビーム生成分離装置を用いた放射化法

表 摩耗検査に有用な、RIビームの供給実績(理化学研究所)

RIビーム生成分離装置	CRIB		RIPS
	Be-7	Na-22	Na-22
RIビーム			
γ線エネルギー keV(分岐比)	477(10%)	1275(100%)、511	
半減期	53day	2.6year	
打込み最大エネルギー MeV/u	4.1	3.7	26.6
ビーム強度 個/秒	1.9×10^6	3.1×10^7	1.5×10^8
RI純度	80%	78%	100%
放射化率 kBq/1h	~10	~0.9	~5
最大飛程(Al材中) μm	67±2	38±3	685±8
照射環境	He中、真空	真空	大気圧

面が局所的に数100Wで発熱し、摩耗検査以前に材質が熱あるいは放射線で損傷することも懸念された。

2-3 RIビーム打込みによる放射化法

近年、重イオン加速器を用いて高エネルギーに加速した安定原子核ビームを、核反応標的内で不安定原子核のビーム(RIビーム)に核変換する技術が進歩してきた。図3のように、摩耗検査に適したRI核種を生成・選別してから部品表面に打ち込んで放射化すると、上記のような部品材料の組成に制約はない。また妨害核種もないのでγ線検出のS/N比、つまり微量摩耗に対する感度が向上する。部品外部でRIに変換されたビームなので、打ち込むビーム量も直接放射化法と比べて4~5桁少なくて済み、材質の放射線損傷も最小限に抑えられる。そのため、プラスチック材、セラミック材などに適用範囲が広がる可能性がある^{3)、4)}。現在理研では、摩耗検査に有用なRIビームとして、Na-22(半減期2.6年)とBe-7(半減期53日)が供給可能である(表)⁵⁾。高エネルギーのRIビームは、物質中の飛程が長いので、大気中にある部品でも打込みが可能である。低エネルギービームの打

込みは真空中に限られるが、飛程が短いので部品表層に高密度でRIトレーサーを打込むのに適している。現状では数時間の照射で、単位深さ当り放射能で約1~10kBq/μmが得られ、従来の直接放射化法による放射化効率にほぼ匹敵してきている。

2-4 高度な摩耗検査の可能性

RIビーム放射化法を用いると、従来法より高度なトレーサーの打込みが可能になる⁶⁾。第一に、打込む核種を選べるので、それぞれ摩耗し合う部品に異なる核

種を打ち込める(図4左)。どちらの核種からの放射能変化が著しいかを測定すれば、部品間の摩耗速度の差異を評価できる。第二に、エネルギー減衰板(図3)を用いて打込み深さを制御できるため、同一部品に2核種をそれぞれ異なる深さに打ち込める(図4右)。潤滑油中に核種1が検出され始めると注意摩耗、核種2が検出されると危険摩耗といった、深さゲージとしての応用も考えられる。またクラック摩耗が発生すると、核種1と2が同時に検出され始める。RIの深度分布は、打込み時の材料表面の粗度を反映してしまうので、打込み面には平滑度が必要である。逆に表層下に空洞があると、その形状が深度分布に投影されるので、多孔性も計測できるかもしれない。打込み深さ幅は、RIビーム生成分離装置の運動量スリットの開口幅で制御でき、数μm幅のパルス状打込みが可能である。

3. 摩耗のイメージング

3-1 閉鎖回転体の摩耗測定

実際に図1で示した摩耗検査法が適用できるのは、エンジンのように潤滑油が装置外部に取り出せる場合に限られる。たとえばベアリングなど多くの機械部品では、RI摩耗粉が高粘度潤滑油に混入したまま装置内部に留まるので、放射能の変化を外部から測定しづらい。このような閉鎖回転体の摩耗測定も可能にするべく、従来の放射能測定に加えてその2次元分布を測定する手法を開発中であ

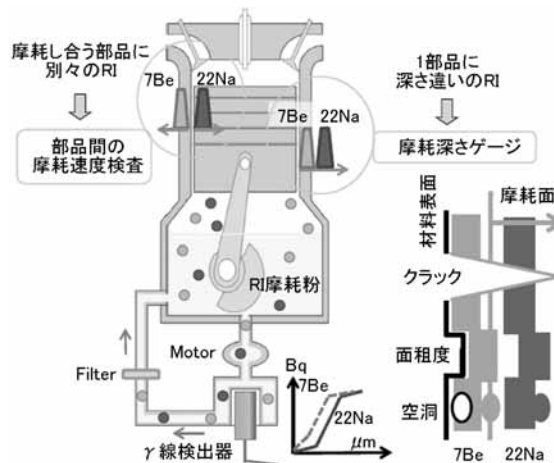


図4 RIビーム打込み法による、高度な摩耗検査の可能性

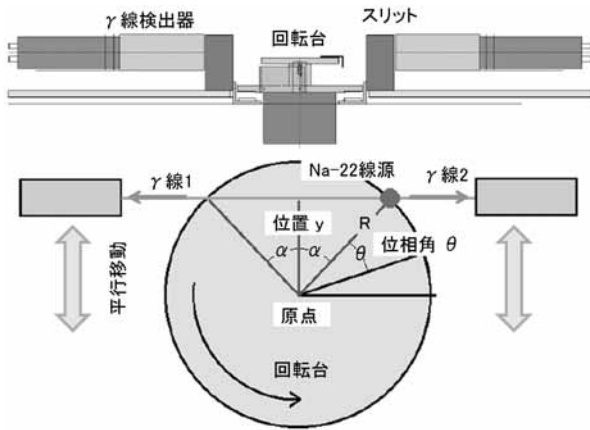


図5 閉鎖回転体の摩耗イメージング測定(テストベンチ)

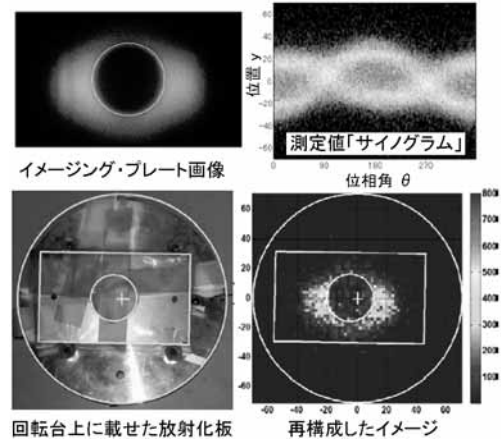


図7 Na-22が面状分布した板を回転させてイメージング

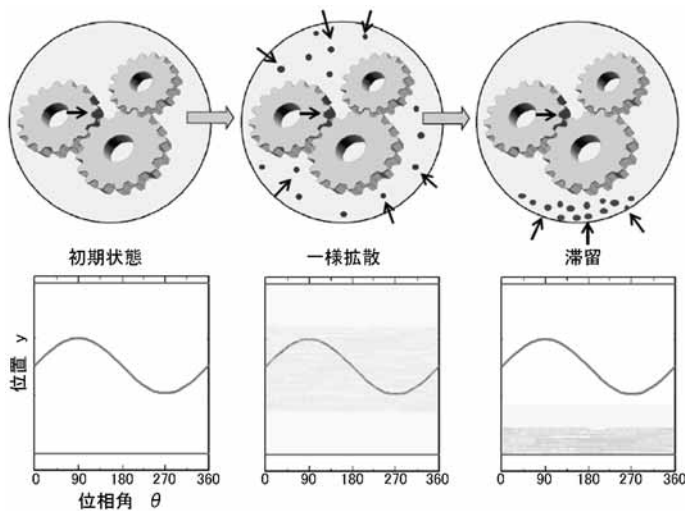


図6 サイノグラムによる摩耗粉の追跡

る⁷⁾。γ線イメージングは医療用PETとして確立した技術だが、多数の検出器を用いるため装置が複雑で高価である。しかしながら検査対象が定速で連続回転する機械部品の場合、ごく単純な検出器構成で放射能分布が測定できる(図5)。すなわち、予め陽電子放出核Na-22で放射化した検査部品を連続往復運動する2台のγ線検出器の間で回転させて、陽電子消滅による2個のγ線を同時検出する。この同時検出率を回転体の角度と検出器の位置の関数としてプロットしたサイノグラムを逆投影解析すると、回転体上の線源の2次元分布が得られる。摩耗によりRIトレーサーが潤滑油中に拡散すると、定常回転線源と角速度が異なるためサイノグラム上では角度方向に様な帯状の成分となる(図6)。この帯状成分の

分布具合から、摩耗粉が潤滑油中に一様拡散しているか、定位置に滞留しているかの区別も可能である。

3-2 テストベンチでイメージング

実際に簡単なテストベンチを製作し原理検証と性能試験を行った(図7)。面状にNa-22を打込んだ板を回転台に乗せ回転数150rpmで測定した。得られたサイノグラムをML-EM法を用いて逆投影した結果、静止状態でイメージングプレートを用いて測定した放射能分布に近い再構成画像が得られた。γ線の同時計測時間は数10μ秒と高速なので、原理的には数万rpmの高速回転体でも測定可能である。

4. まとめ

摩耗検査にRIを用いる技術は、放射線

の規制が厳しくなるにつれて利用が減少してきたそうである。検査には非密封放射線を扱える管理区域が必要で、ユーザーにとっては敷居が高い。理研は、非密封試験が実施できる住重試験検査(株)、低エネルギーRIビーム生成装置(CRIB)を所有する東大原子核科学研究センター(CNS)と協力して、このRIビーム打込み法による摩耗検査の普及と高度化を模索している。現在は、実際の産業機械部品を用いてこれら応用の可能性の実証を試みている段階である。この手法を用いれば、必要最小限の放射化量で比較的クリーンに、上記のような付加価値の高い摩耗検査が可能となるであろう。

参考文献

- 1) 山本、畠山:RADIOISOTOPES、45、p.700(1996)。
- 2) W. C. McHarris, M. L. Mallory, et al.: Nuclear Physics, A299, p.593(1990)。
- 3) P. Fehsenfeld, et al.:Nuclear Physics, A701, p.235c(2002)。
- 4) 上本、鶴野、ほか:自動車技術会2011年春季大会、横浜。
- 5) A. Yoshida, T. Kambara, R. Uemoto, et al.:Nucl. Instrum. Methods, B317, p.785(2013)。
- 6) 特願2014-4555。
- 7) 特願2014-34417。