

RIビームの工業応用～表面摩耗量検査法の開発～

理研・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 吉田 敦



<http://www.rarf.riken.jp/>



重イオン加速器施設：サイクロトロン、リニアック



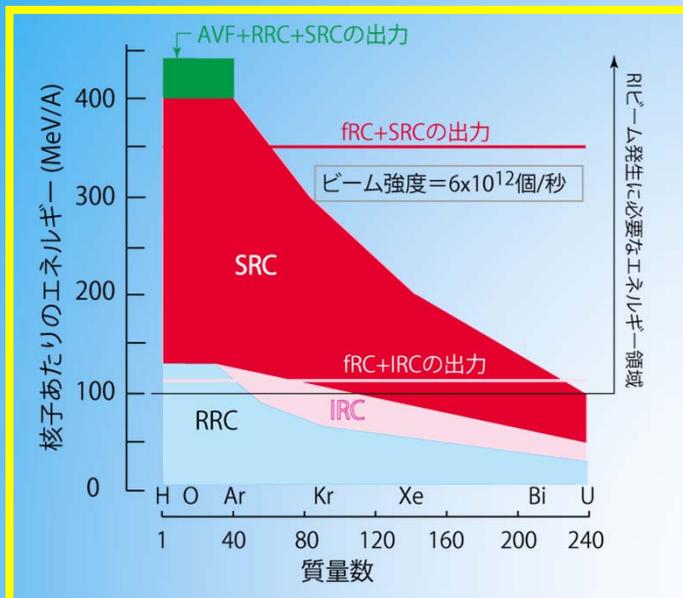
SRC



RILAC

(内容、Key words)

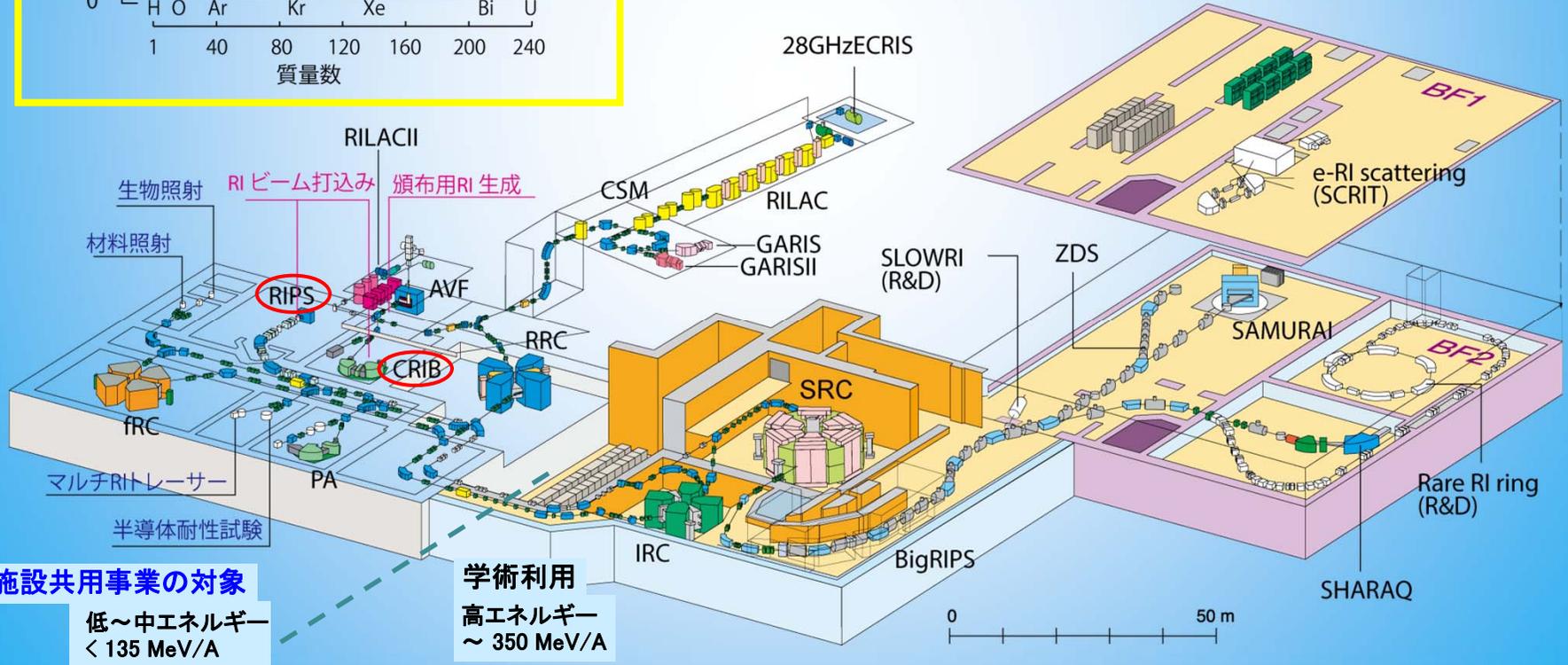
- * 放射性同位体 (RI) ビーム で、**機械部品摺動部の摩耗検査**をする手法の開発
RI トレーサー : ガンマ線で、運転中の機械装置の**内部状態をリアルタイム観察**
- * 新手法「**RI をビームとして打込む**」によるメリットは…



仁科加速器センター RIビームファクトリー (RIBF) では、

- * 世界最高水準の重イオン加速器群を用いて
- * 水素～ウランまでの重イオンビームを
- * 世界1番のビーム強度 (6x 10¹²個/秒) で供給可能です。

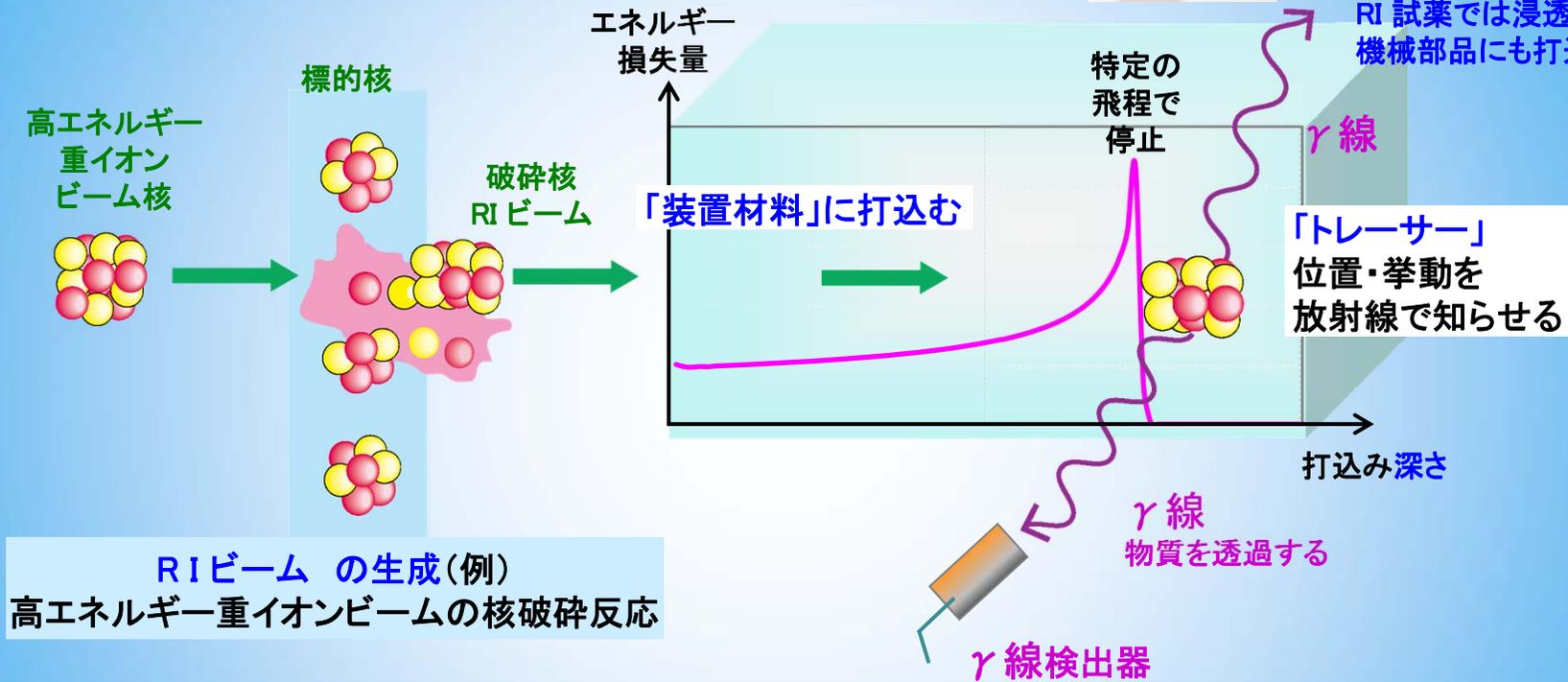
重イオンビームから生成される「大強度RI ビーム」を用いて、
企業等を対象とした施設共用促進事業 も行っています。
<http://ribf.riken.jp/sisetu-kyoyo/index.html>



放射性同位体 Radio Isotope (RI) ビーム



RI 試薬では浸透困難な機械部品にも打込める



RIビームの生成(例)
高エネルギー重イオンビームの核破碎反応

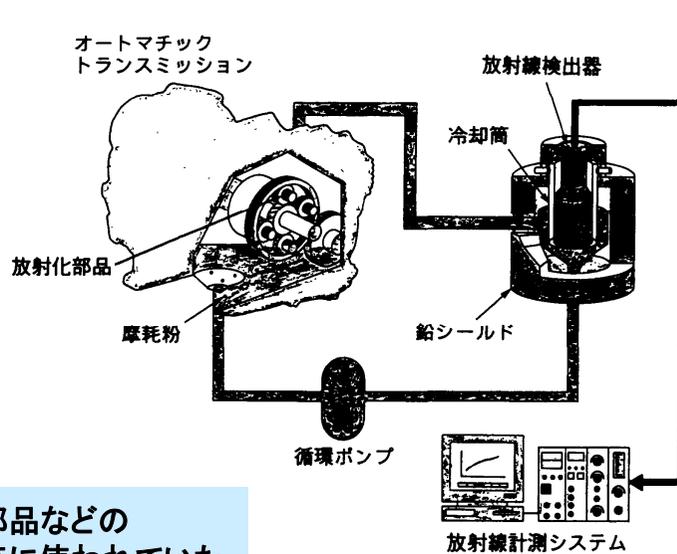
RIビームの特徴

- * 化学的性質は安定同位体と全く同じ。また、**材質の元素組成に依らず**、有用なRI核種を打込める。
- * **透過性のあるγ線**を出しながら壊変する。→ 装置「外部」から測定可能。
- * **トレーサーとして、極微量分析**に使える。→ ppb, ppt 以下の極微量なトレーサー量でも測定可能。
- * **特定の深さに打込める**。→ 打込みエネルギーを減速させれば、極表面にトレーサー濃度を集中できる。**コーティング材等にも応用できるのでは？**

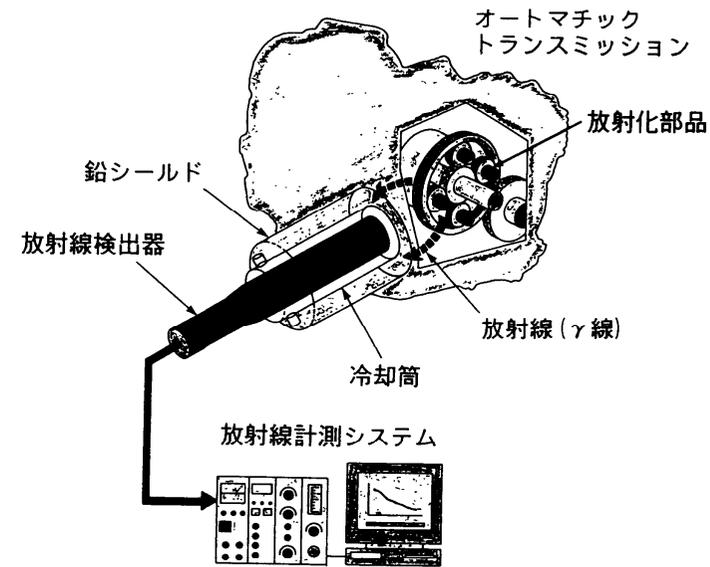
「直接放射化法」によるトライボロジー検査

“放射化” = “トレーサーを注入”すること

(株)豊田中央研究所 山本匡吾 RADIOISOTOPES 46(1997)472-479



累積放射能測定法



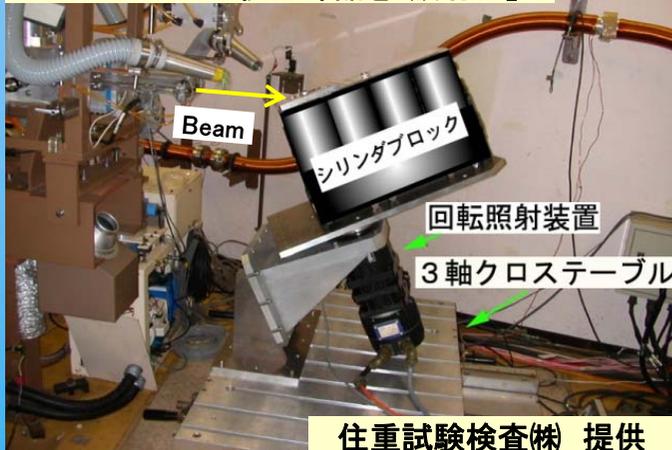
残留放射能測定法

(他参考文献)
「トライボロジーハンドブック」
4.1.4 ラジオアイソトープ・トレーサー法

自動車部品などの
摩耗検査に使われていた

図 3 RI法による摩擦計測法

イオンビームで検査部品を「放射化」



住重試験検査(株) 提供

「直接放射化法」の歴史

ref.) M.Yamamoto, JRIA Radioisotopes, 45(1996)700

‘1970年代～

Radionuclide Technique in Mechanical engineering (RTM)

Karlsruher Institute (FZK, KIT), Germany

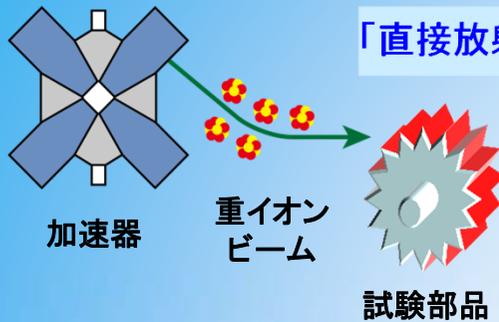
Thin Layer Activation method (TLA: 薄層放射化)

A.E.R.E., Harwell, England

Surface Layer Activation method (SLA)

Spire Corp., USA

《 従来の放射化手法 》



「直接放射化法」： 部品にイオンビームを直接照射して放射化していた

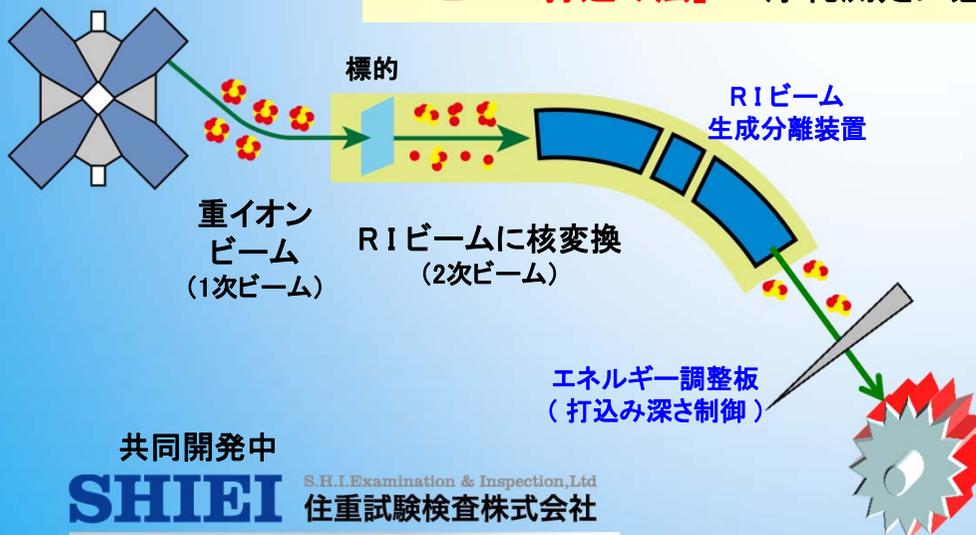
例) p, d, 3He 等 10~20MeV ビームを金属部品に照射

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

- * 部品材質の組成に制約があった
長寿命 RI を生成可能な「金属素材」のみ
- * 合金等では妨害核種も生成されてしまう
- * RI 濃度の深さ制御が困難。
- * 放射化時の局所発熱 (数100W) や、放射線損傷による材料の劣化。

《 新手法の開発 》

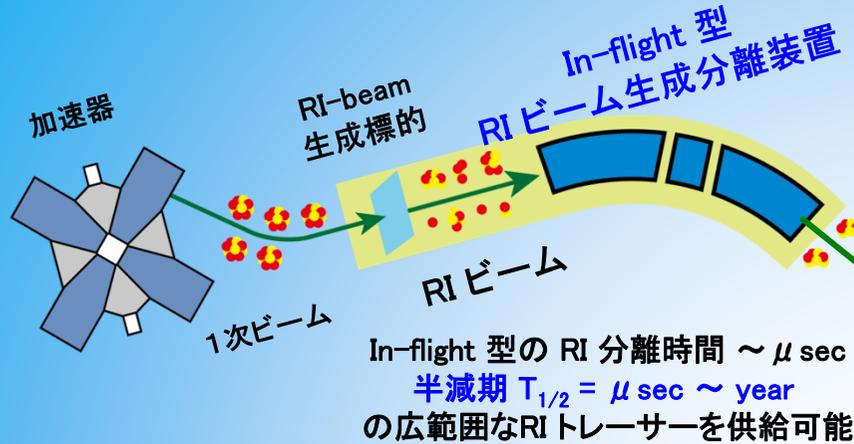
「RIビーム打込み法」： 摩耗測定に必要な RI のみを、ビームとして注入



(特長)

- 部品材質に制約無し (軽核:C,N,O は短寿命RIのみ)
→ プラスチック、セラミック、DLC 材等も可能
- 妨害核種が無い。
→ バックグラウンド・フリーで高S/N比の極微量分析
- 有用なRI 核種 を選べる(元素種、半減期等)
→ 長寿命核種: 長期試験用
短寿命核種: 高放射能なので高精度な試験
流体の流量・流速観察等
- 打込み深さを制御できる
- 非破壊で部品への損傷が少ない
- 大気圧環境下でも注入可能

RIトレーサーを用いた摩耗試験法



RIトレーサーを用いた摩耗検査法

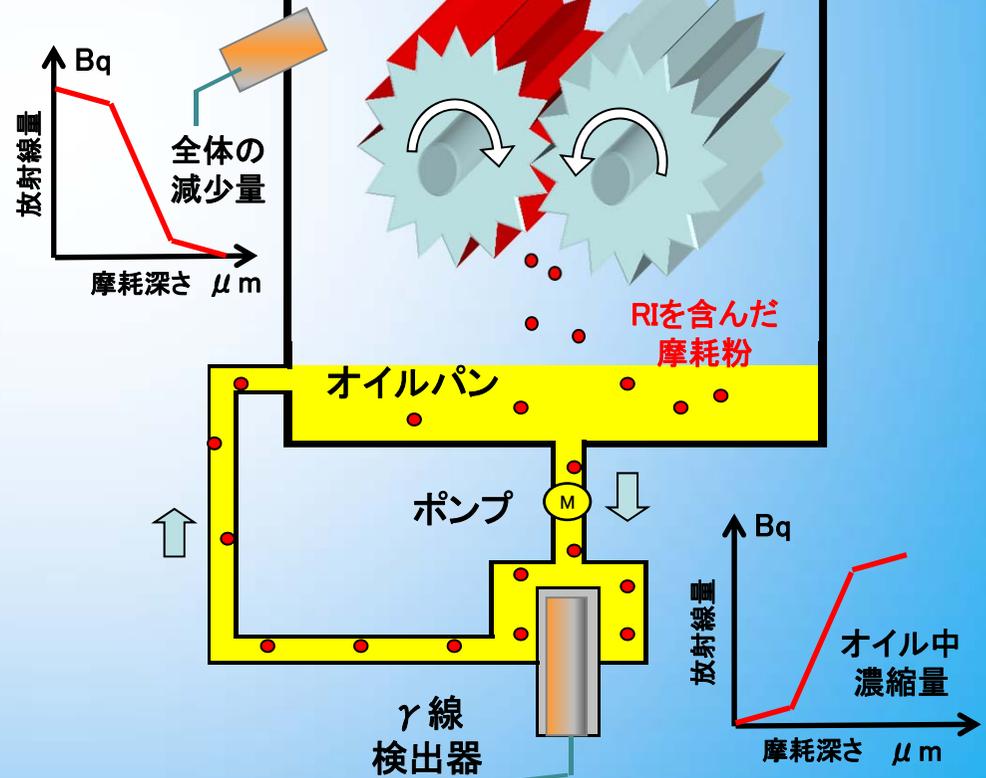
見えない摩耗を
リアルタイムで計測

《 利点 》

- * 装置の内部部品を、稼働状態で、リアルタイム測定
- * 測定時間の短縮
分解→洗浄→計測が不要
運転条件を変化させながら測定
- * 高感度・高精度
微量摩耗 $< 1 \mu\text{m}/\text{hour}$ も測定可能

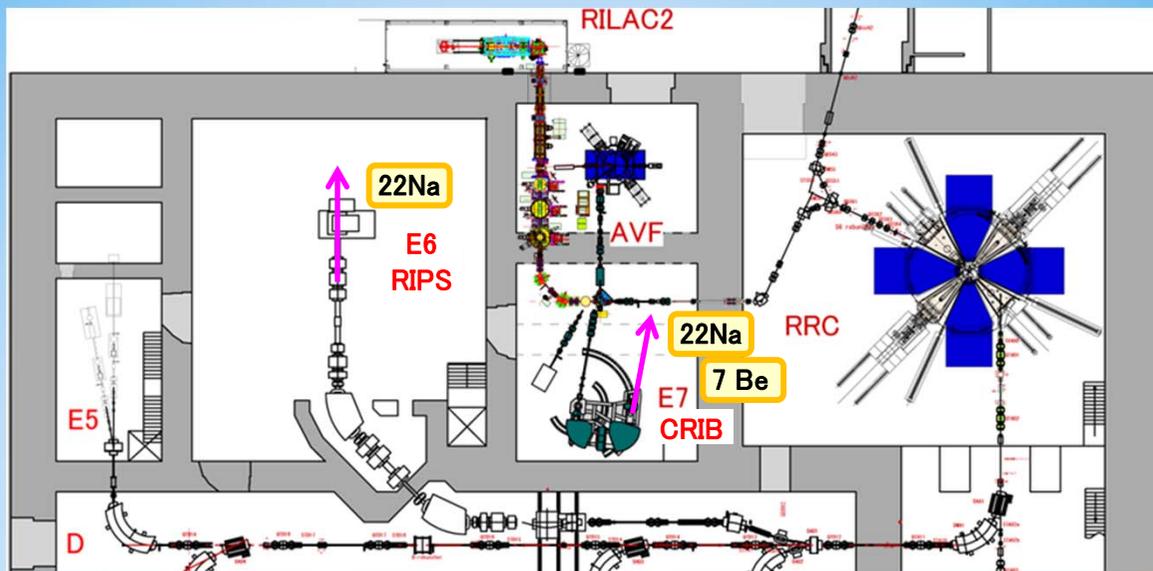
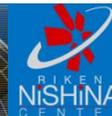
《 応用例 》

- * 自動車；エンジンシリンダー、ブレーキ…
- * 駆動機；シャフト、ベアリング、ギア…
- * 潤滑油特性試験



RIビーム供給施設

RIBF施設共用促進事業
高エネルギー重イオン・RIビーム応用研究の推進



大強度で ⇒

深くまで
打込める ⇒

このような RI ビーム
の供給は、
(きっと) 世界一

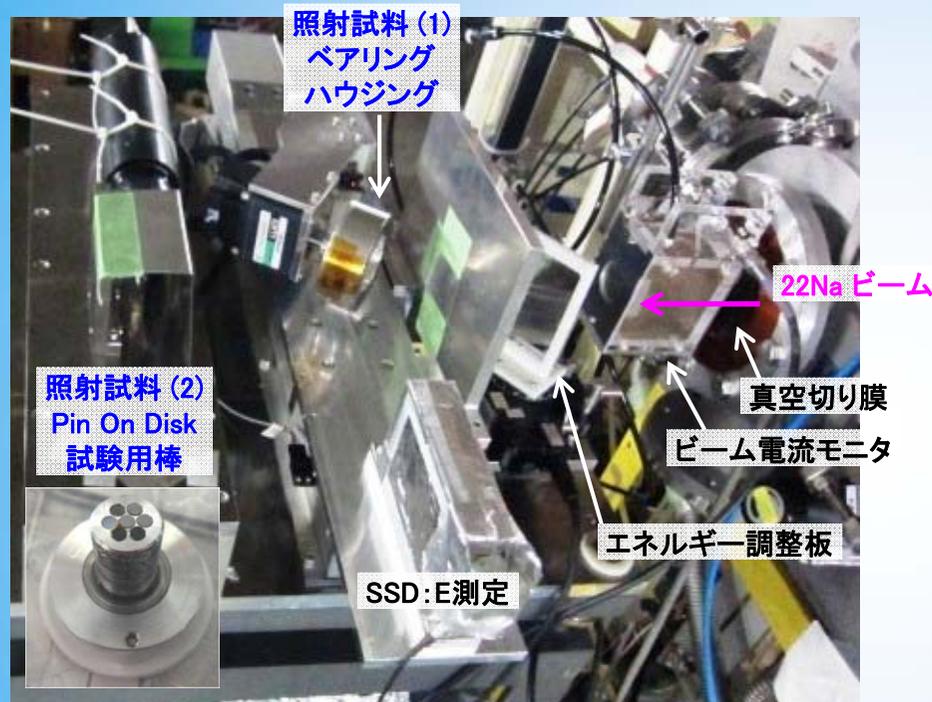
生成分離装置		RIPS		CRIB	
RIビーム		²² Na	²² Na	⁷ Be	
エネルギー	MeV/u	26.6	3.7	4.1	
強度	個/秒	1.5x10 ⁸	3.1x10 ⁷	1.9x10 ⁸	
RI 純度		100%	78%	80%	
不純物	核種		¹⁹ F, ²² Ne(安定核)	⁶ Li(安定核)	
ビームサイズ	φ fwhm	~3cm	~0.5cm	~1cm	
放射化率(1時間照射当り)	kBq/1h	~5	~0.9	~10	
最大飛程(AI材中)	μm	685±8	38±3	67±2	
RI寿命	半減期	2.60年		53.2日	
崩壊時の放射線		γ 1275keV (100%), γ 511keV		γ 478keV (10%)	
照射環境		大気圧	真空	He中, 真空	
	加速器	RRC(K=540)		AVF (K=70)	
1次ビーム		²³ Na ¹¹⁺	²² Ne ⁷⁺	⁷ Li ²⁺	
エネルギー	MeV/u	63.4	6.1	5.7	
強度	pμA	~1.0	~0.3	~1.0	
RI生成標的		Be 1.5mm	H ₂ 53kPa	H ₂ 101kPa	
核反応		核破砕	核子移行 (p,n)		

MeV/u : 核子当たりのエネルギー

nA ~ 6 x 10⁹ 個/秒
μA ~ 6 x 10¹²

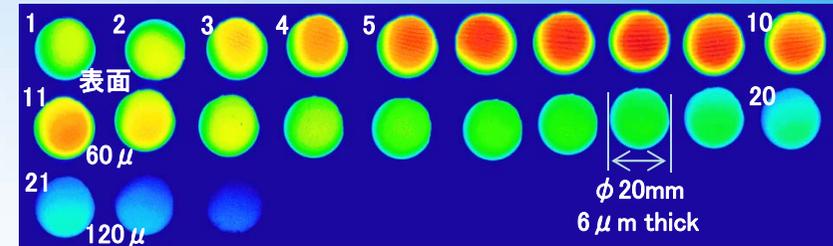
Bq : ベクレル
1秒間の崩壊数

トライアル利用: ^{22}Na を試料表面 $\sim 100\ \mu\text{m}$ に注入する試験

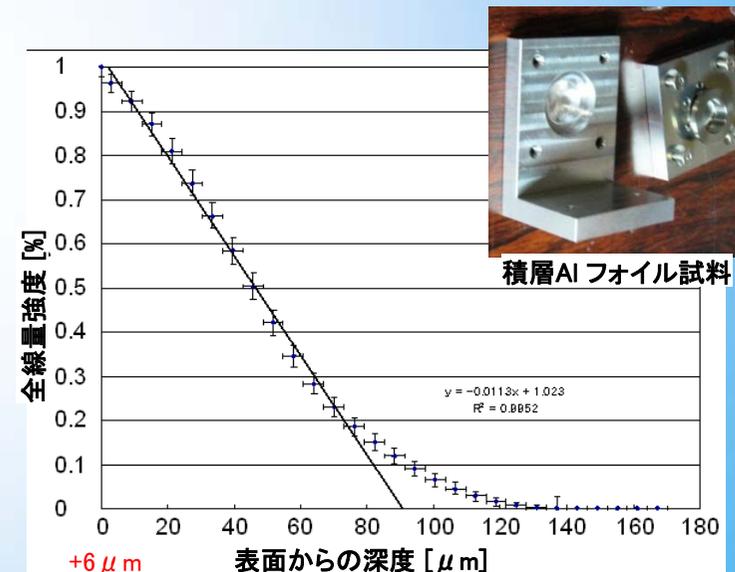


- * 最大飛程 $\sim 650\ \mu\text{m}$ (真空)、 $100\ \mu\text{m}$ (大気)
- * 大気中照射 大型部品の照射も可能

深さ方向の RI 強度分布測定



積層Al フォイル の イメージングプレート (I.P.) 像 (住重試験株 測定)



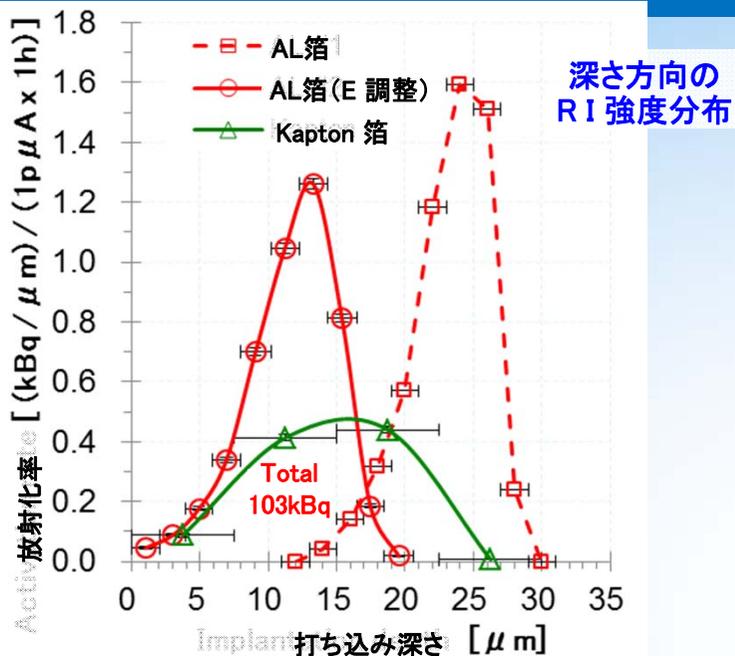
結果

- * 注入量: $2 \times 10^8\ \text{cps} \times 26\ \text{時間照射} = 172\ \text{kBq}$
- * 深さ方向濃度: 全線量強度比は $80\ \mu\text{m}$ までほぼ直線

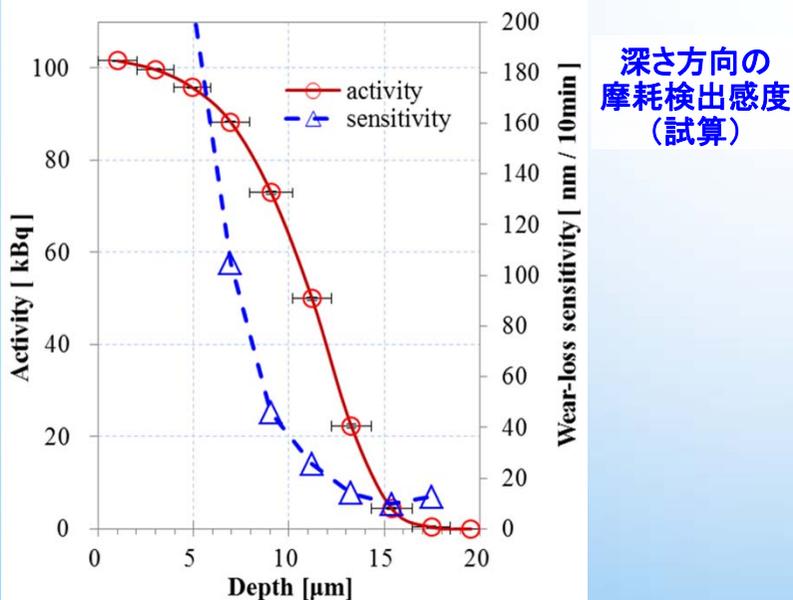
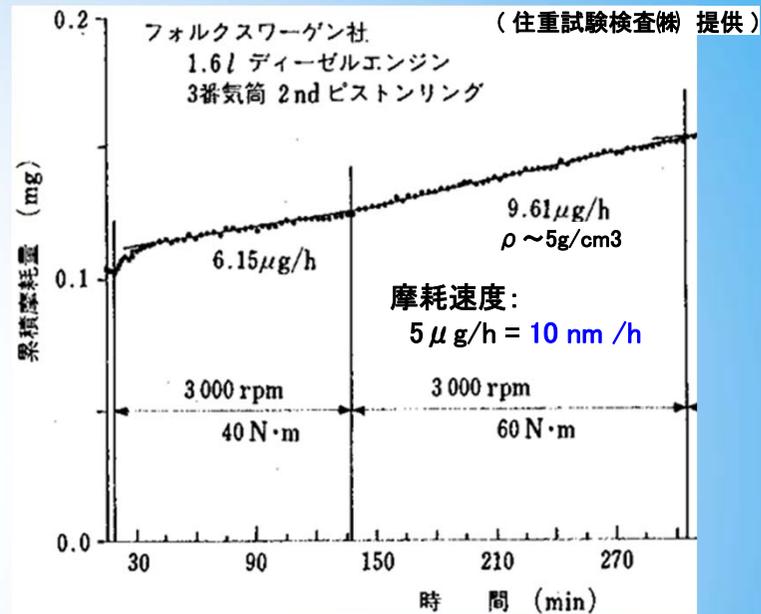
成果公開

- T.Kambara et.al, AIP Conf. Proc. 1412, 423(2011)
- R.Uemoto et.al, 自動車技術会2011年春季大会, 143-20115142
- A.Yoshida et.al., Nuclear Instrument & Method B317, 785-788(2013)

Be-7 ビーム の 供給試験 @ CRIB



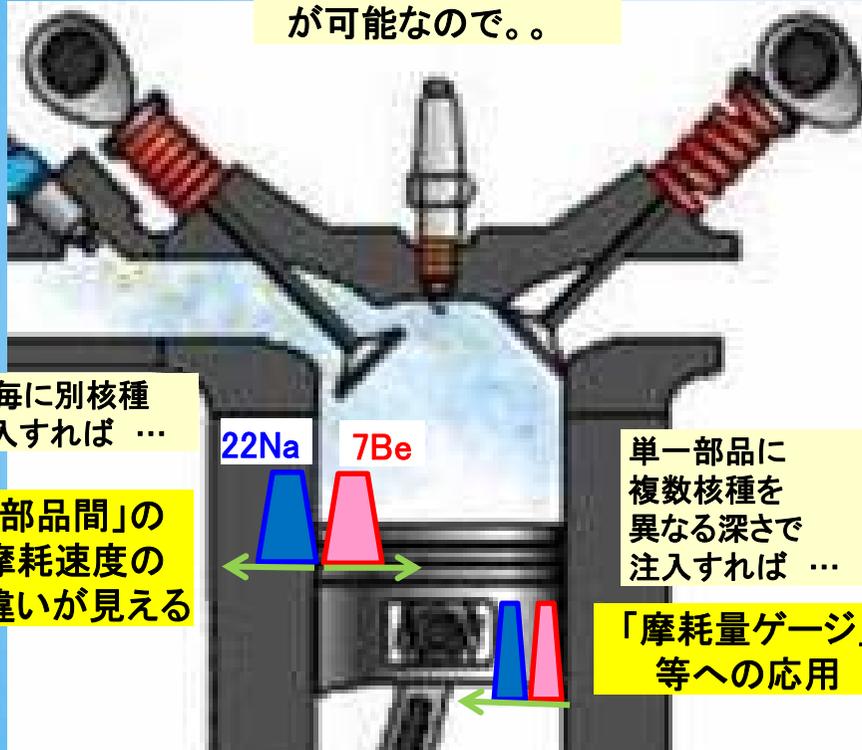
「直接放射化法」で測定した エンジン・ピストンリングの摩耗量



10時間照射で、Peak 線量 $\sim 13 \text{ kBq} / \mu\text{m}$
 Ge 検出器 (効率 1%) で、10分毎に摩耗量を測定する場合、
検出感度 $\sim 20 \text{ nm} / 10 \text{ min}$ 測定が可能
 → 従来法の「直接放射化法」と、
 同程度の感度まで達成できている。
 RIトレーサーを用いた極微量分析の威力。



RIビーム打込み法は
・多核種同時
・深さ制御
が可能なので。。



部品毎に別核種
を注入すれば ...

「部品間」の
摩耗速度の
違いが見える

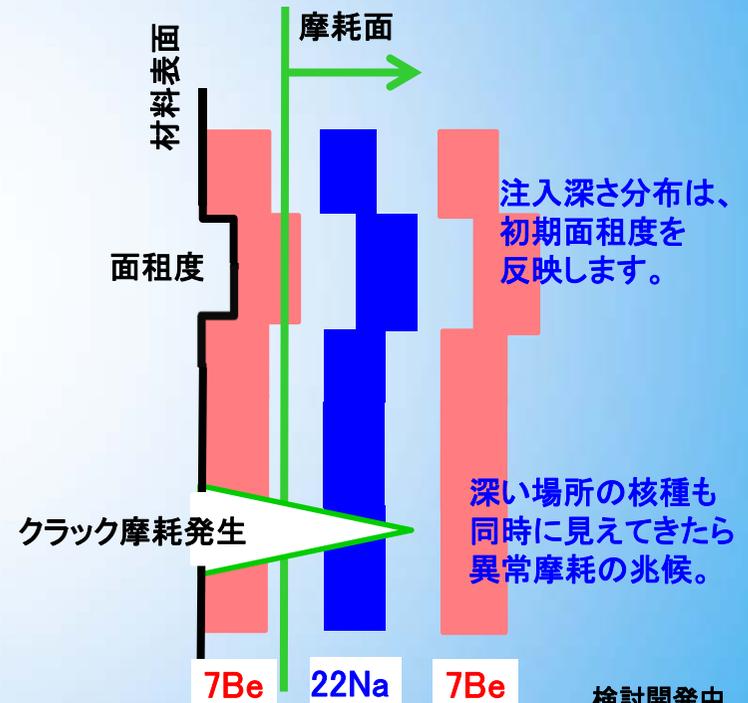
単一部品に
複数核種を
異なる深さで
注入すれば ...

「摩耗量ゲージ」
等への応用

などの、高度な応用が可能

特許出願済
共同研究中

より詳細な摩耗現象も
オンライン観測できるかも ...



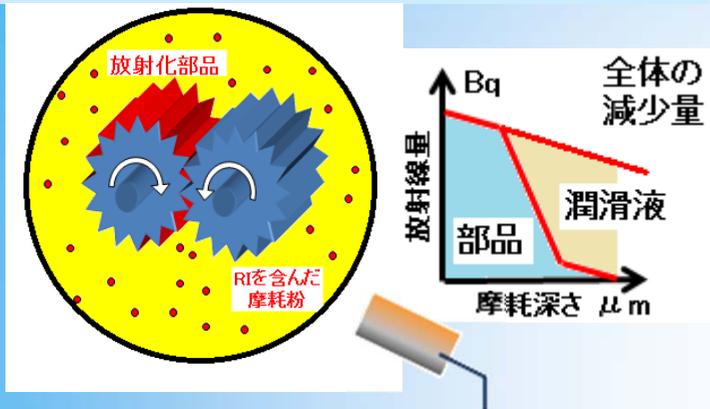
閉鎖回転装置のイメージング



Gamma-ray Inspection of Rotational Object (GIRO)法 神原正

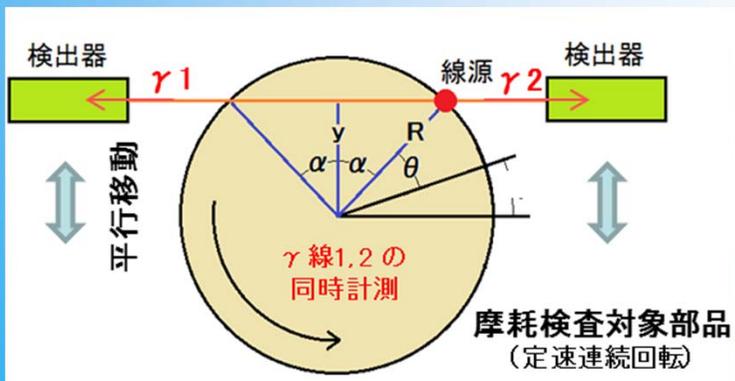
《 問題点 》

循環装置のない閉鎖系では、
部品と潤滑液の放射能が線量測定では区別できない



《 開発中 》 閉鎖回転装置の摩耗検査法

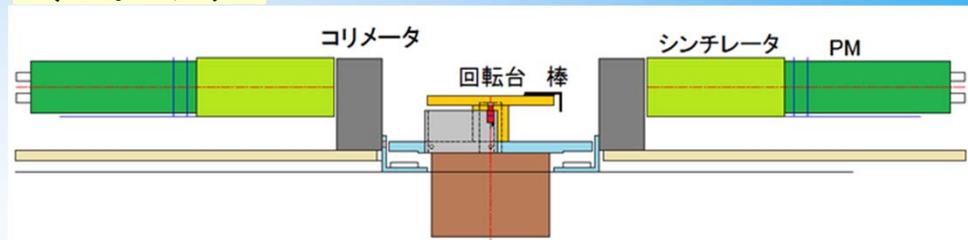
PET診断 : 「人」静止、「検出器」周囲に多数配置
GIRO法 : 「検査対象」回転、「検出器」1対のみをスライド



特許出願済
外部資金「NSKメカトロニクス技術高度化財団」

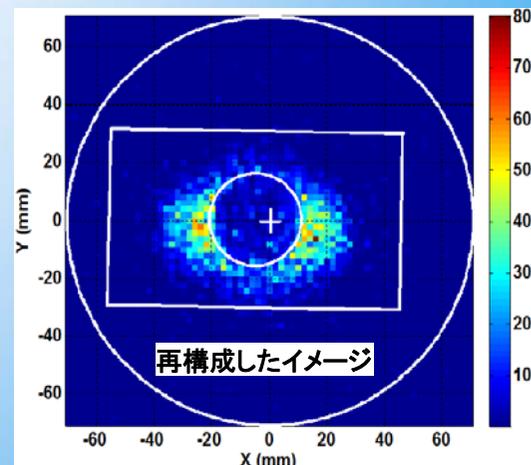
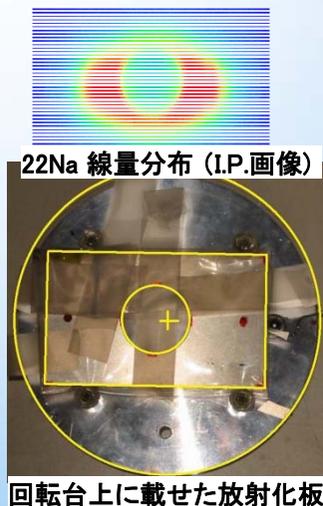
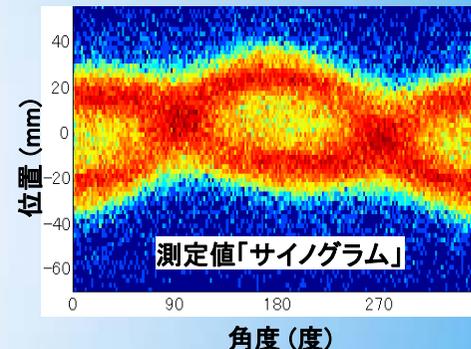
2014.02/28 トライボコーティングの現状と将来

テストベンチ



測定(例)

^{22}Na (β +崩壊核)が、
面状に分布した板を
回転させて計測した。



施設利用料金

RIBF施設共用促進事業
高エネルギー重イオン・RIビーム応用研究の推進



本事業HP <http://ribf.riken.jp/sisetu-kyoyo/>

課題種別		施設種別	エネルギー種類 MeV/u	ビームコース	実験施設構成別利用費 円 / 時間 (万円 / 日)	消耗品費
有償利用	低エネルギー 1次ビーム RIビーム	AVF単独, CRIB	軽・重 4~11	a)	15,600円 (= 37万円)	施設消耗品 6,600円/時 = 16万円/日 実験消耗品 (課題毎に 個別契約)
		RILAC単独	重 < 4	b)	34,500円 (= 83)	
	中エネルギー 1次ビーム	AVF+RRC	軽・重 < 135	c)	60,200円 (= 145)	
		RILAC+RRC	重 < 80	c)	83,000円 (= 199)	
	中エネルギー RIビーム	AVF+RRC+RIPS	RI < ~100	d)	82,000円 (= 197)	
		RILAC+RRC+RIPS	RI < ~50	d)	105,000円 (= 252)	
トライアル	免除 (最大2回まで)					重イオン線型加速器 (RILAC)

c) E5コース
大気中照射装置
真空中照射装置

d) RIPSコース
RIビーム

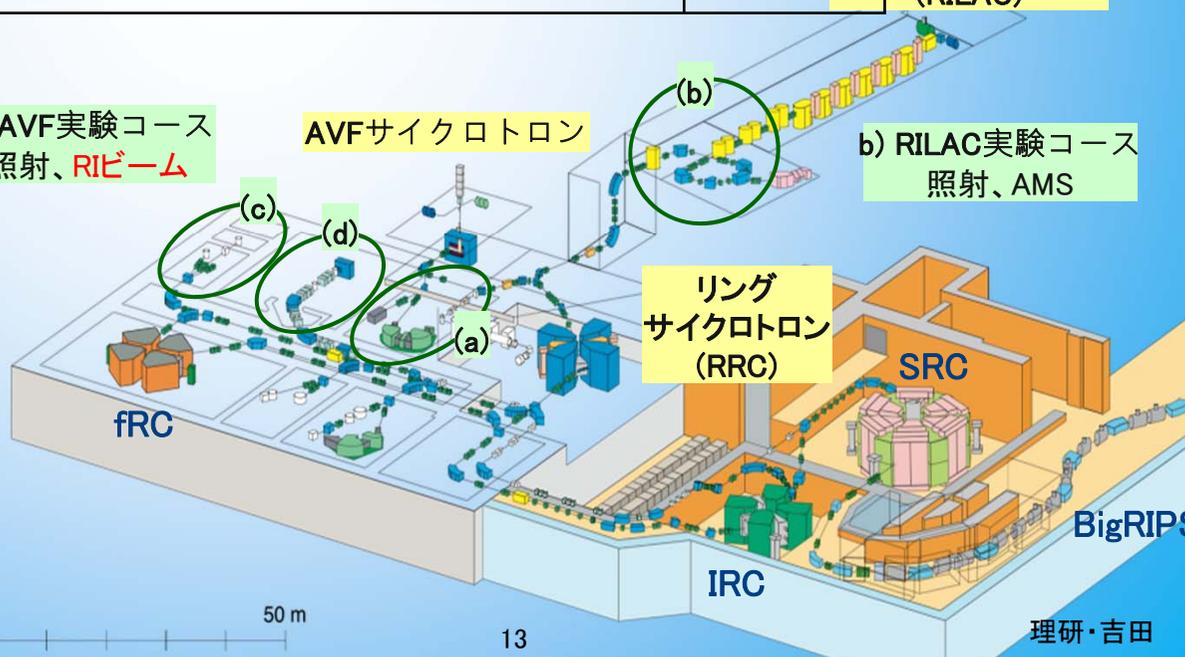
a) AVF実験コース
照射、RIビーム

AVFサイクロトロン

(b)

b) RILAC実験コース
照射、AMS

ビームタイムは年2期制です
前期: 4~9月
後期: 10~3月
各期開始の5か月前に課題申請





- * 放射性同位体 (RI) ビーム を、「機械部品摺動部の摩耗検査」 に適用する手法を開発している。
RI トレーサー : ガンマ線で、**運転中の機械装置の内部状態をリアルタイムで観察可能**
- * **RI をビームとして打込むことで、**
検査対象材料の元素組成比に**依らずに、高 S/N 比で摩耗量の極微量分析が可能になる。**
- * より高度な摩耗検査法を開拓中。
2核種打込みで、部品間の摩耗速度の差異を同時測定。
打込み深さを制御 (パルス状、平滑化)して、摩耗量ゲージ 等への応用の可能性。
閉鎖回転系のイメージング で、潤滑油が取り出せない装置にも対応したい。

《業務分担》

理研・産業連携チーム : RI ビームの照射、照射技術開発。

住重試験検査(株) : 摩耗検査の実施・評価 (非密封RI 取扱い施設)

トライボコーティング技術への応用の可能性がございましたら、是非ともご教示頂きたく存じます。