

# 量子ビーム研究開発・利用の促進方策について

- 知のフロンティアを拓き、先端産業をイノベートする多彩なビーム利用の可能性 -

2006年1月

文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課  
量子放射線研究推進室

# 量子ビームとは

電子、中性子、イオン、光量子、中間子、ニュートリノ等のビームの一般的総称



【1981年】電子線  
加速器利用開始



【1990年】JRR-3改  
造中性子利用開始



【1991年】TIARA  
利用開始



【1994年】HIMAC  
利用(治療)開始

## 加速器技術及びレーザー技術の目覚しい進展

重粒子線や新たなエネルギー領域の中性子、X線等の発生・制御、並びにそれらビームの高強度化

量子ビームによる計測・測定技術の高度化と応用分野の多様化

**「量子ビームテクノロジー」と呼ぶべき新たな技術領域が形成**

特に期待される研究領域・産業応用分野

これまで不可能だった物質の構造・機能解析や生体内現象の評価、微細加工が可能

材料・ナノテク分野

ライフサイエンス・医療分野

環境・エネルギー分野

最先端の科学技術・学術分野、各種産業にいたる幅広い分野において活用が期待

# 量子ビームテクノロジーの進展

世界最高水準の陽子ビーム  
世界最強クラスの中性子ビーム

J-PARC

X-FEL

(X線自由電子レーザー)

RIBF

世界最高水準のRIビーム

SPRING-8

HIMAC

Bファクトリー

世界最高強度の電子・陽電子衝突加速器

トリスタン

日本初の電子・陽電子衝突加速器  
世界最高エネルギー

KEK陽子シンクロトロン

日本初

核研電子シンクロトロン

日本初

理研サイクロトロン

日本初

全国の研究・教育・医療機関、企業に1000を超える加速器

ライフサイエンス・ナノテク・環境分野の多彩な  
研究基盤と医療・産業利用の多角的な展開

タンパク質構造解析

先進医療

極微量元素分析

先端材料

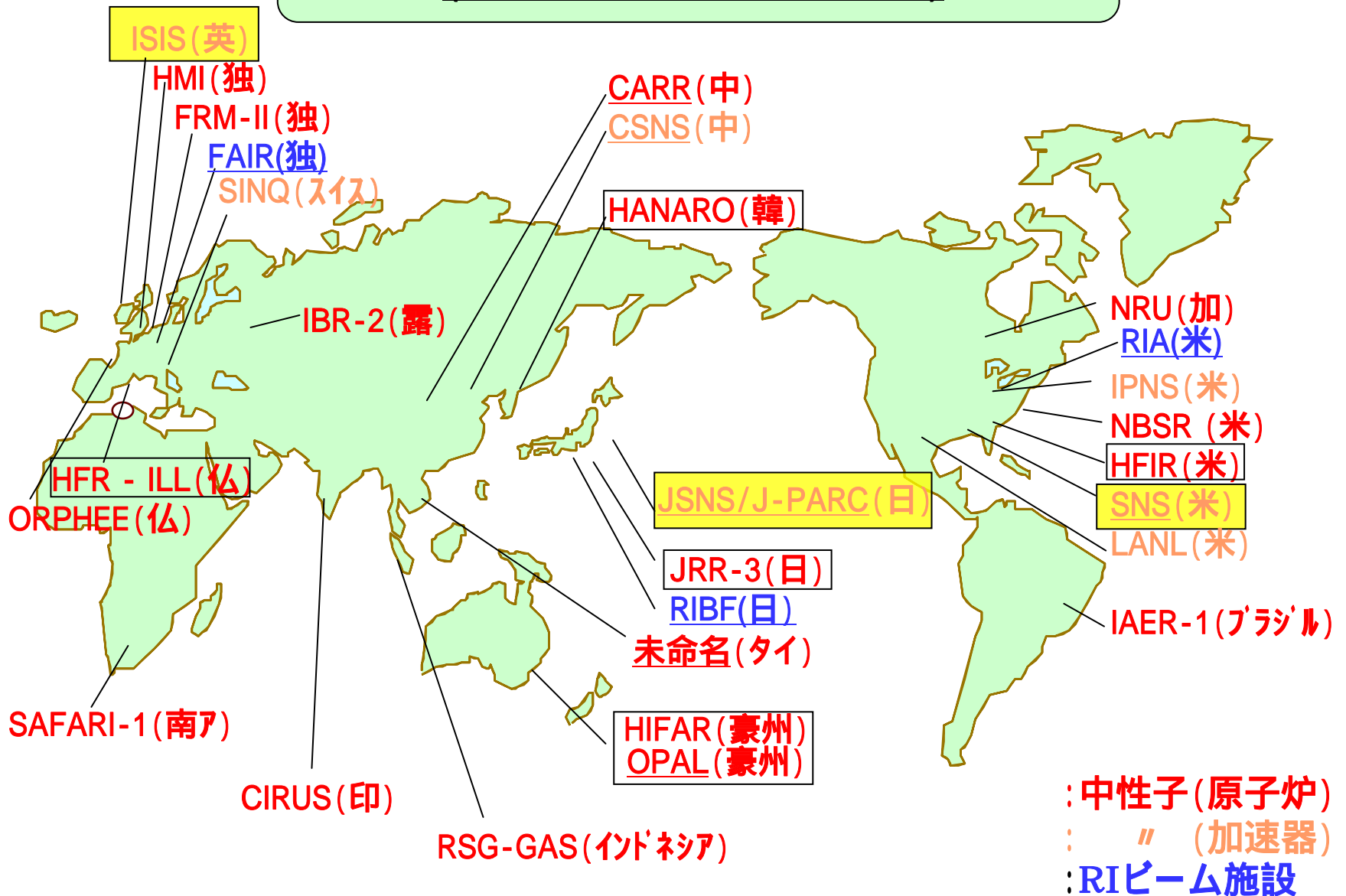
癌治療

加速器駆動未臨界実験炉

PET用アイソトープ製造

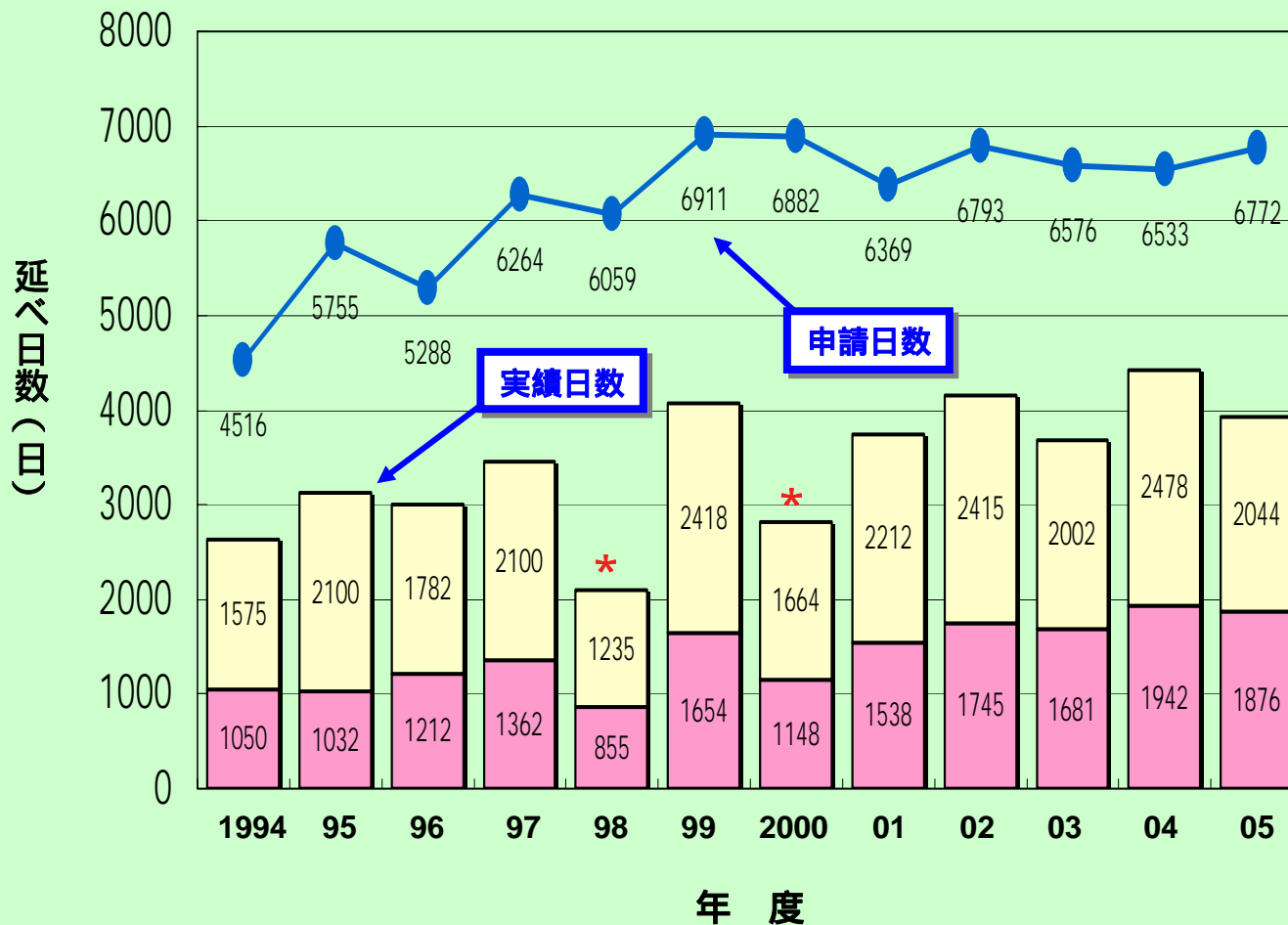
科学技術にチャレンジする先端加速器  
・ビーム技術の発展・高度化

# 世界の主要中性子源とRIビーム施設 (アンダーラインは建設・計画中)



# JRR-3(研究用原子炉)におけるビーム利用の推移

(中性子散乱実験による利用)



施設の稼働率  
の限度に到達



国内ユーザーの  
海外流出の懸念



\* 長期間の原子炉停止  
により稼働日数が低減

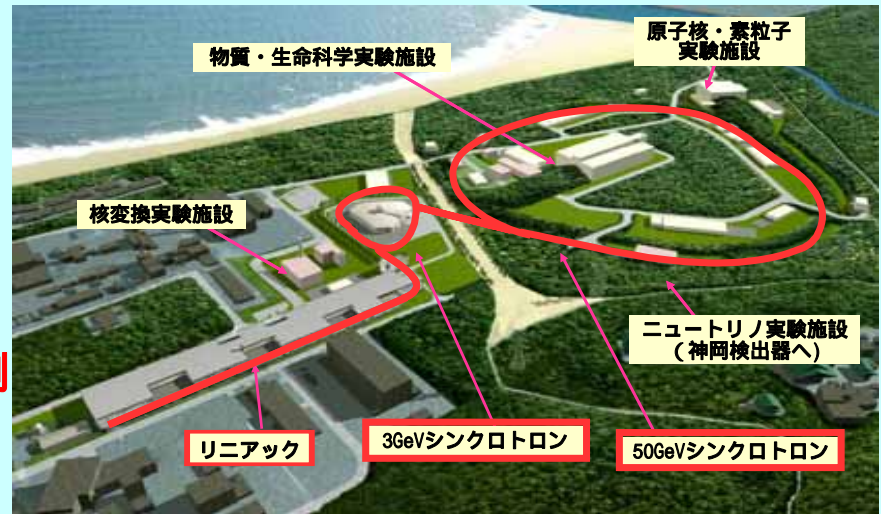
# J-PARC (大強度陽子加速器施設)

[日本原子力研究開発機構(JAEA)・高エネルギー加速器研究機構(KEK):東海]

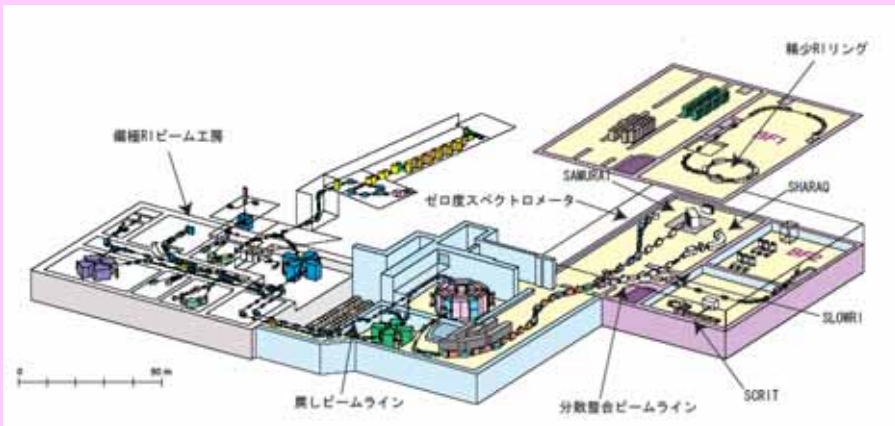
世界最高性能の**中性子**実験施設と原子核・ニュートリノ実験施設を有する世界唯一の学際複合研究施設

## 中性子科学研究

- ・材料中の水素や軽元素の正確な位置決定
- ・物質やタンパク質の分子レベルでの運動の観測
- ・新しい科学分野の飛躍的発展の基盤
- ・新材料開発、水素社会を支える革新的技術開発による新産業の創生



# RIビームファクトリー [理化学研究所:和光]



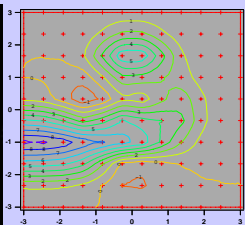
水素からウランまでの全元素の不安定原子核(RI)ビームを世界最大の強度で発生させる最先端の加速器施設

- ・原子核の存在を表す核図表の拡大を図る  
原子核構造の究極の理解や元素誕生の謎の解明を目指す
- ・医療・材料・環境分野などにおけるRIの利用技術の拡大等に資することを目指す



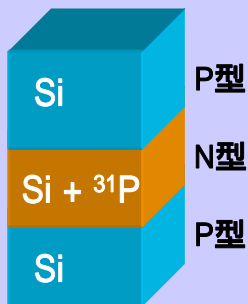
# 重点研究分野における量子ビーム利用の方向性

## 材料・ナノテク分野

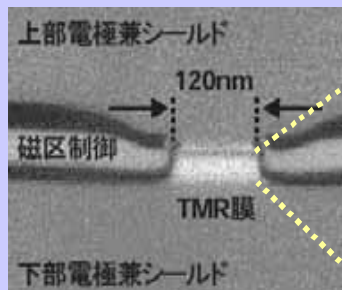


応力分布測定と有限要素法解析

大型構造物の**非破壊残留応力**の評価

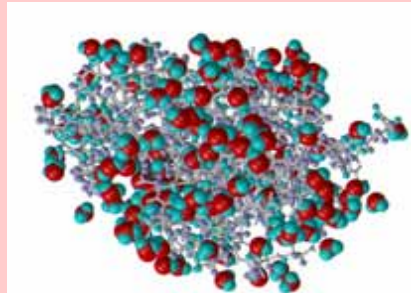


半導体への**元素ドーピング**

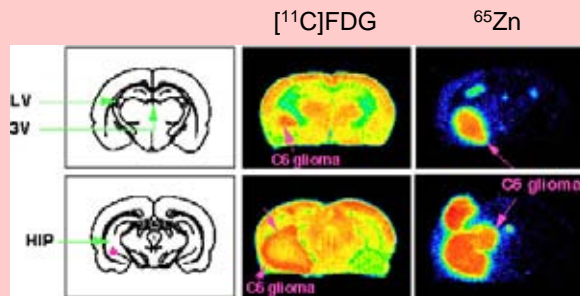


**ハードディスク**の記録密度の向上

## ライフサイエンス・医療分野



中性子を利用した**タンパク質**の構造・機能解析

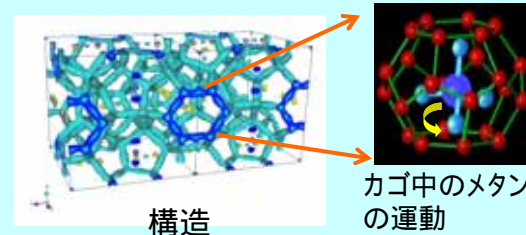


イオンビームによる**がん治療**



イオンビーム等を用いた**植物の品種改良**技術の普及・高度化

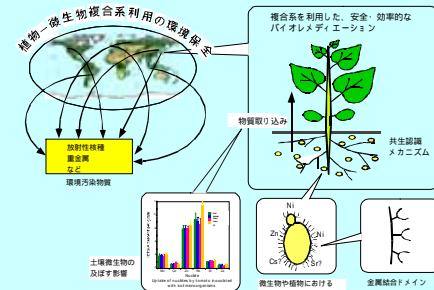
## 環境・エネルギー分野



中性子を利用した**メタンハイドレート**の機能解析



多重ガンマ線検出装置 (GEMINI-II)

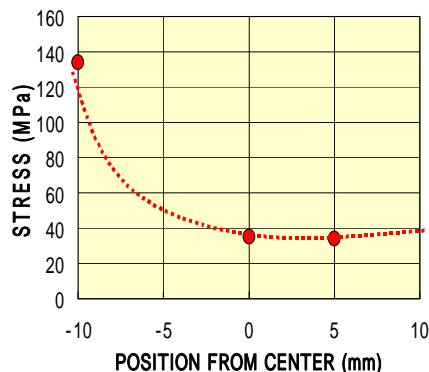
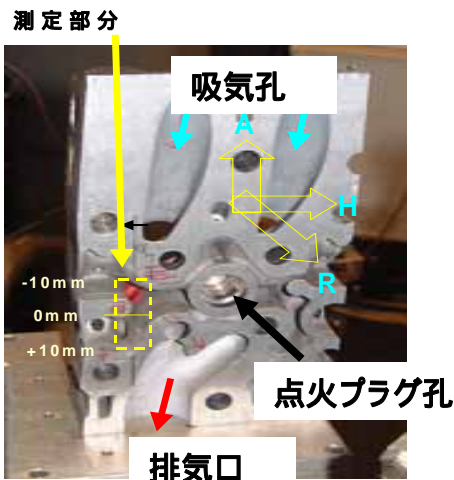


**環境微量分析技術・トレーサ**利用

# 残留応力評価法の開発と利用

工業製品の材  
料強度評価・  
健全性評価

RESA利用の  
30%が有償  
利用(2004年度)



残留応力解析用  
中性子回折装置 RESA

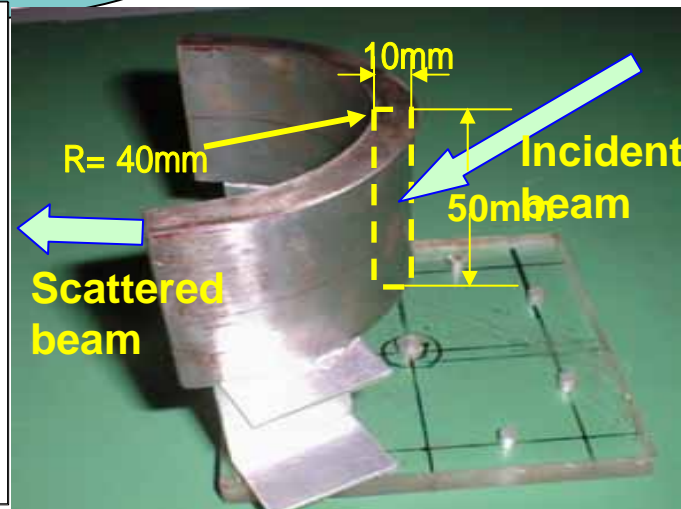
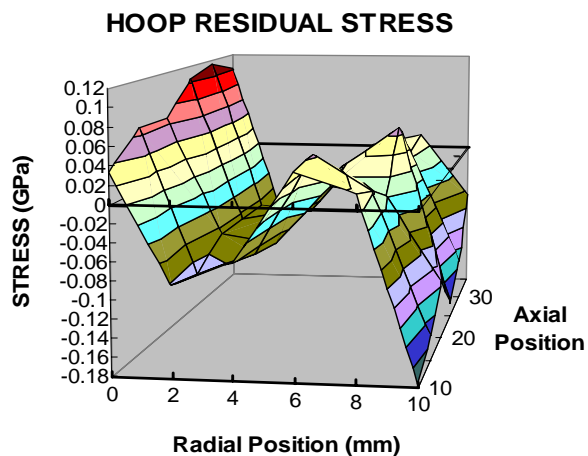
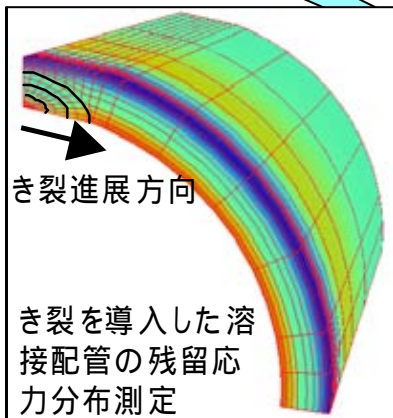
- ・最小測定体積：2 mm × 2 mm × 2 mm
- ・1 プロファイル測定時間：6時間程度  
(アルミニウム製)

自動車エンジン内部の応力測定 → 健全性診断  
→ 製造方法の改善 → 高性能低価格エンジン完成

大型構造材料への適用

残留応力評価法の開発

- ・応力分解能：± 30MPa程度(鉄鋼)
- ・測定対象：工業製品サンプル

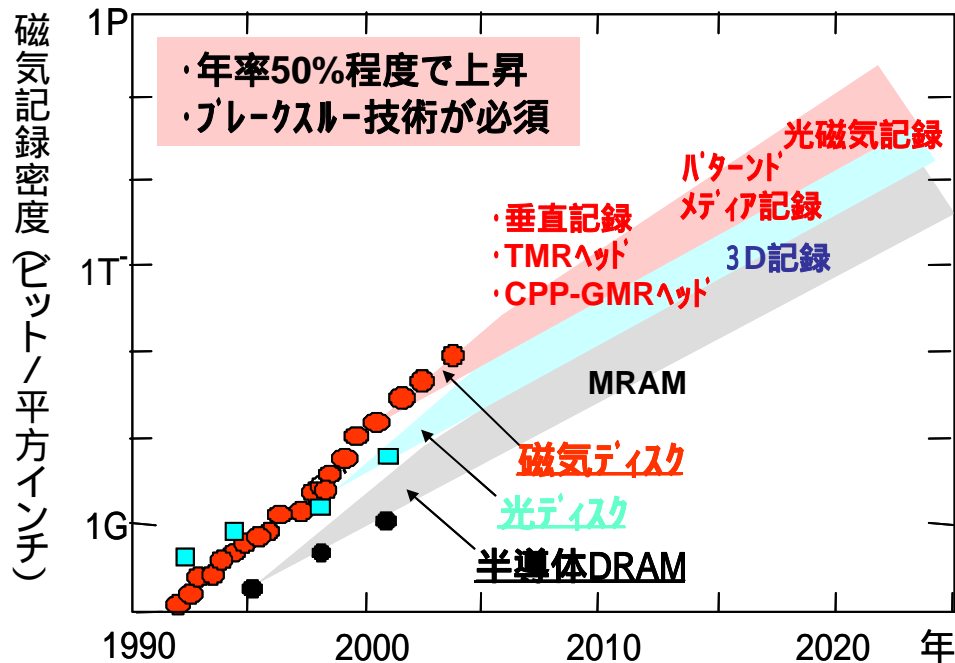




# 中性子によるナノ磁性・ナノデバイス開発

資料提供 / 林(日立製作所)

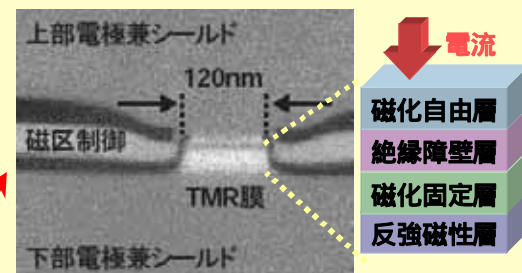
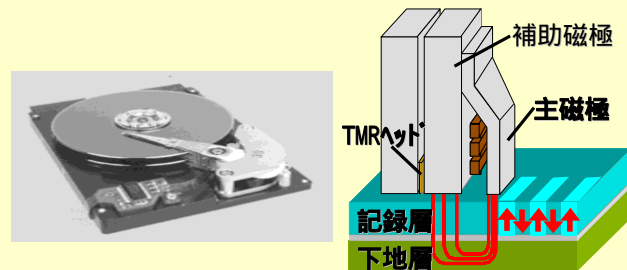
## 記録密度の推移と推定



## 中性子による磁性層の評価

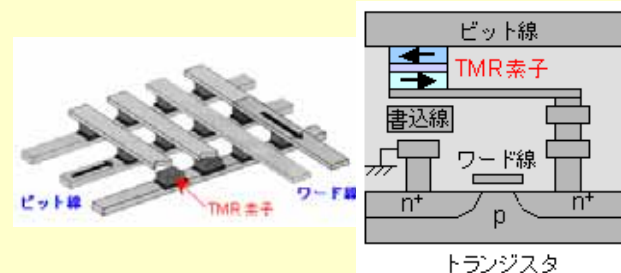
磁気記録やMRAM分野で多用する磁性層の磁気構造の解明により高度な磁気構造制御を実現し、次世代の情報産業を支援。

### 磁気ディスクの構造 (垂直記録とTMRヘッド)

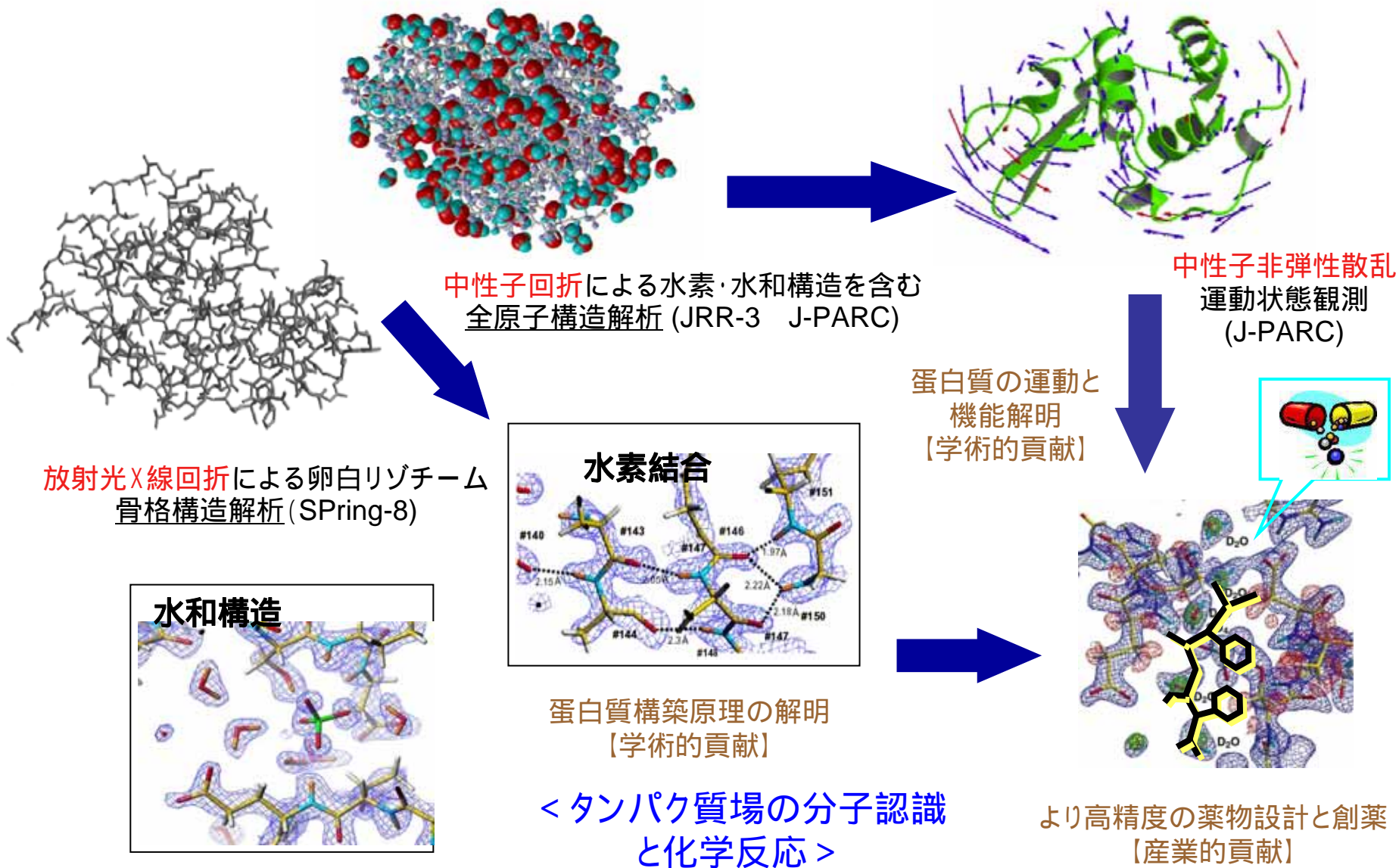


TMRヘッドの観察像と積層構造

### 次期半導体DRAMの構造 (MRAM:TMR構造利用)



## 中性子による タンパク質の分子認識と化学反応

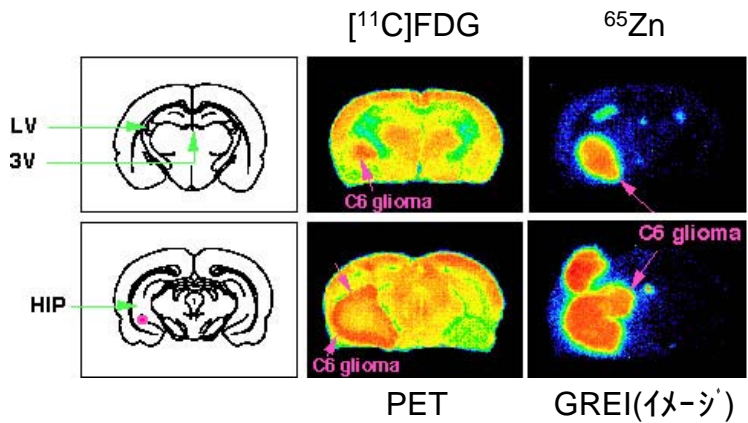


# RIビームの画像診断・イメージングへの応用

理研では、新原理に基づく半導体検出器を開発。高分解能、高感度、位置精度に優れた臨床医学用ガンマ線イメージング装置**GREI**の開発研究を行っている。

RIビームファクトリーで生成した多数の核種のうちから、好病巣トレーサー (RI) を探索して生体内に投与。病巣に到達集積したRIから発せられるガンマ線を検出し、病巣位置を特定。**GREI**は、PETでは利用できない陽電子崩壊核種以外での放射性医薬品 (RI) に対しても対応可。新診断法への応用が期待される。

C6 Glioma (癌) のあるRATの脳の  
イメージングプレート像  
マルチトレーサーによってZnの集積を確認



## GREIによるがん診断・分子イメージング

**GREI検出系**

**GREI (gamma-ray emission imaging)**  
電極分割Ge半導体ガンマ線検出器を利用  
(理研で特許出願)

位置分解能	200倍 (1cm)	0.05mm
多核種同時測定	2核種	いくつでも可能
エネルギー分解能	100倍 (100keV)	1keV)
高い定量性		

### 検出技術開発研究

- ・市販の放射性医薬品も利用可能
- ・寿命のやや長い核種も得ることができるようになるので近傍に加速器不要でコストダウン

### 期待される実用例

がん、脳機能異常、  
型糖尿病、肝機能異常  
の早期発見  
白内障・緑内障の進行度を診断

### 新放射性医薬品開発研究

・これまでより高性能な核医学医療が地域中核病院でも可能に！  
・日本発の新技术装置により世界規模のマーケットを席卷！

# 新エネルギー材料としてのガスハイドレート

将来のエネルギー利用形態の一役を担う



工場・家庭の熱源



未来の自動車

自動車用の燃料

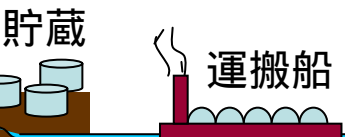
メタンガス

炭酸ガス

炭酸ガス  
ハイドレート

メタン  
ハイドレート

地球環境保全  
(温暖化防止)



貯蔵

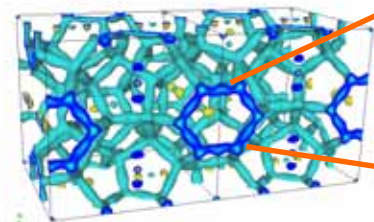
運搬船

近海

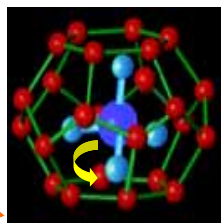
炭酸ガスの固定化

中性子を用いた構造、形成・  
分解過程の研究

中性子の軽元素識別能力  
・運動検知能力を活用



構造



カゴ中のメタン  
の運動

水素社会に貢献

人工のクリーンエネルギー

水素ハイドレート

水素ガス

HTTR



原子炉を用いた水  
素ガス生産



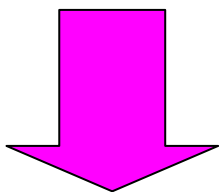
## RIビームの環境物質・トレーサ供給への応用

RIビームファクトリーにより、これまでに生成することができなかった**新たな核種(元素)**が**トレーサーとして利用可能**になり、それらを**シングルトレーサーとしても供給可能**とすることで更に詳細な研究の展開が可能になる。

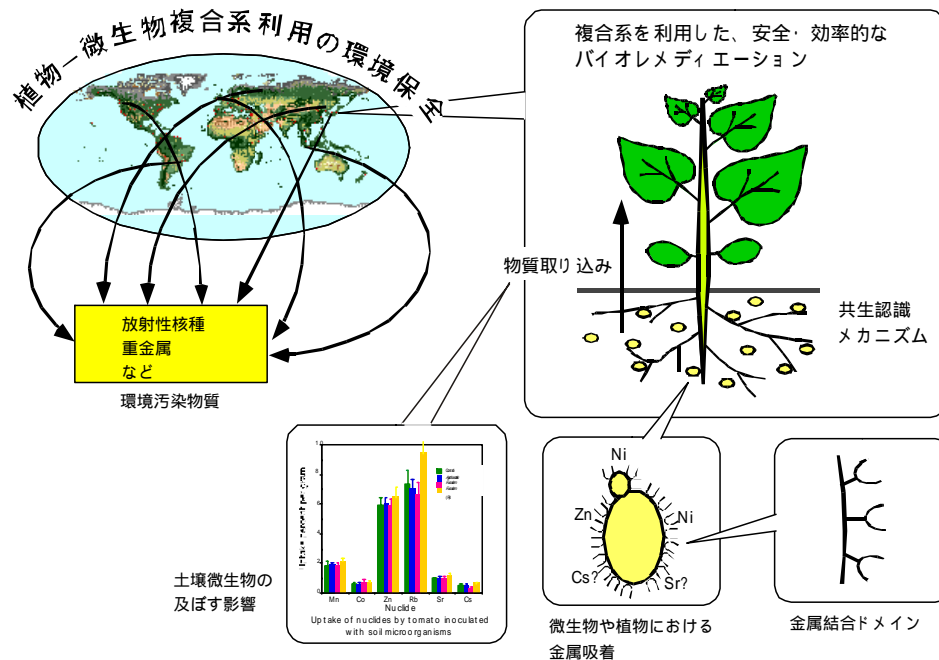
RIBFによるマルチトレーサー/シングルトレーサー利用により、

- ・環境物質の循環過程の解明
- ・ファイトレメディエーションの促進  
(植物等利用による環境修復)

への貢献

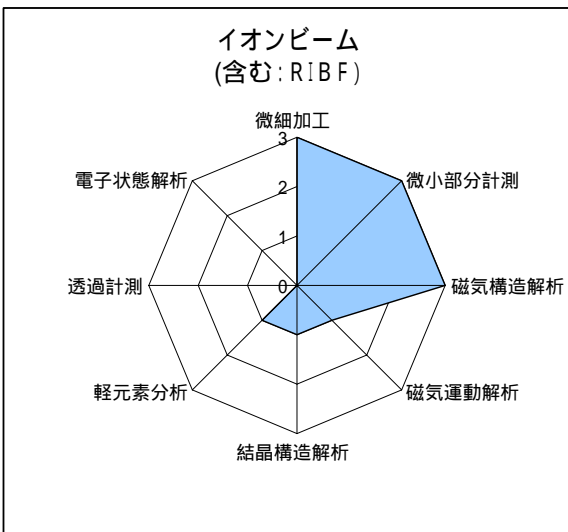
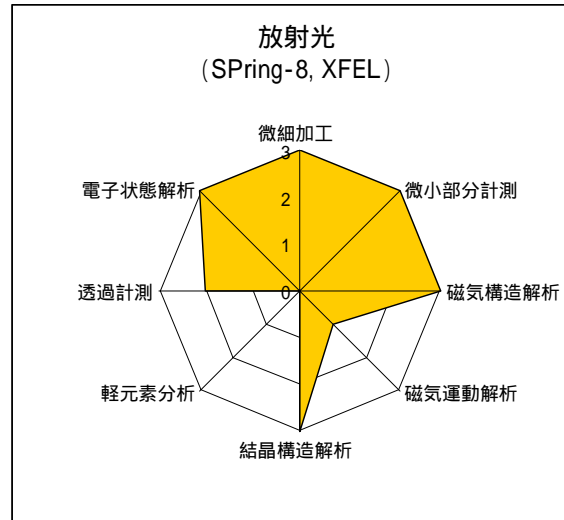
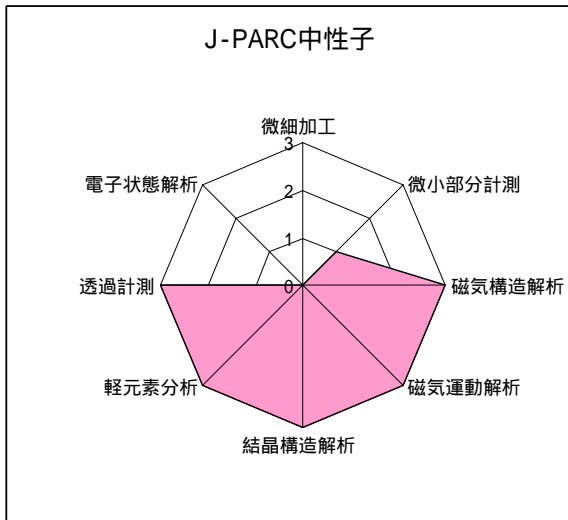


環境問題の解決へ





# 各種ビームの相互補完性



**注**  
 0 : 不可能  
 1 : 限定的に可能  
 2 : 条件付で可能  
 3 : 可能

**微細加工:**  
 材料にマイクロメートル以下の加工ができる (例: リソグラフィなど)

**微小部分計測**  
 物質のマイクロメートル以下の分解能で元素分析等が可能であること (元素分析、不純物分析、構造解析等)

**磁気構造解析**  
 物質の性質とりわけ磁気的な性質を理解・利用するために、電子や原子核がつくる磁気モーメントの配列や安定性を解析する。(永久磁石材料、薄膜磁気記録材料など)

**磁気運動解析**  
 物質の性質とりわけ磁気的な性質を理解・利用するために、電子や原子核がつくる磁気モーメントの協調運動 (エネルギー、波数、伝播方向) や安定性を解析する。(高温超伝導体の発生機構、磁気記録の安定性など)

**結晶構造解析**  
 物質の性質・機能を理解・利用するために、原子の並び方を解析する (物質同定の基本的データ)

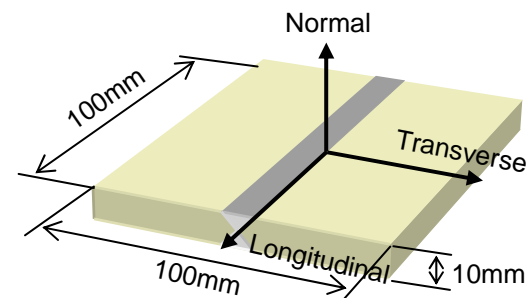
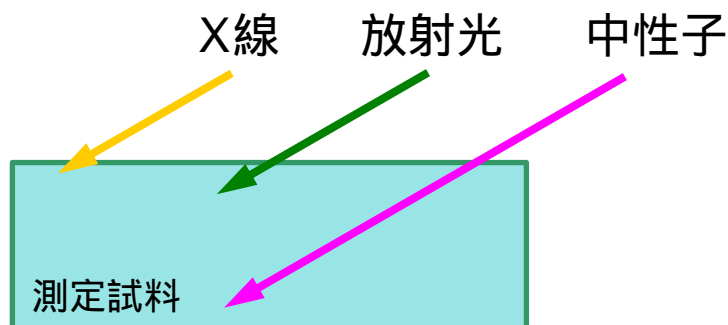
**透過計測**  
 物質や材料内部の状態が非破壊で観測できる (植物の根の水分吸収過程等)

**軽元素分析**  
 物質や材料内部の水素、リチウムなど軽元素に対して構造解析、元素分析等が可能であること

**電子状態解析**  
 物質の導電性や磁気的性質、反応性などの性質を決める電子の状態を解析できる

# 中性子・放射光による残留応力評価

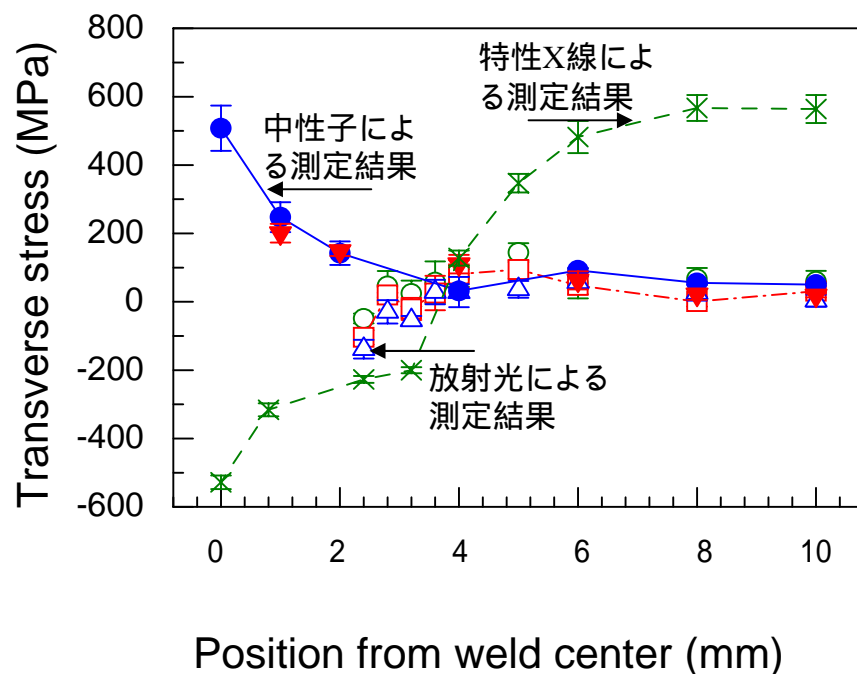
## 吸収特性(侵入深さ)の違いによる各ビームの適用限界



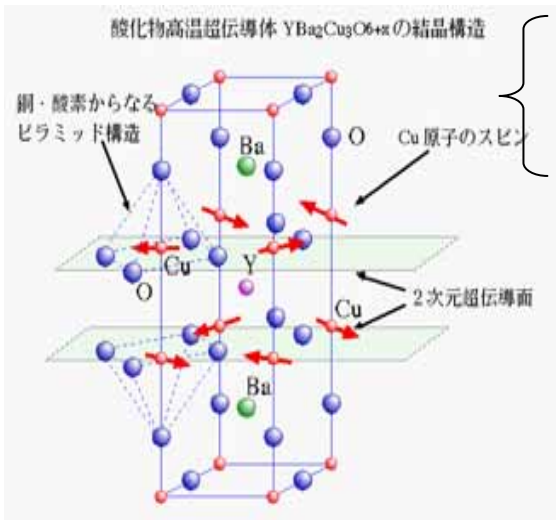
- × 0.006 mm (特性X線: 5.4KeV)
- 0.05 mm (放射光 : 66keV)
- 0.085 mm (放射光 : 66keV)
- 0.12 mm (放射光 : 66keV)
- 2.0 mm (中性子 : 0.21nm)
- 5.0 mm (中性子 : 0.21nm)



各測定法を組み合わせれば  
材料内部の詳細な残留応力  
分布状態を把握可能



# 中性子・放射光による酸化物高温超伝導の機構解明

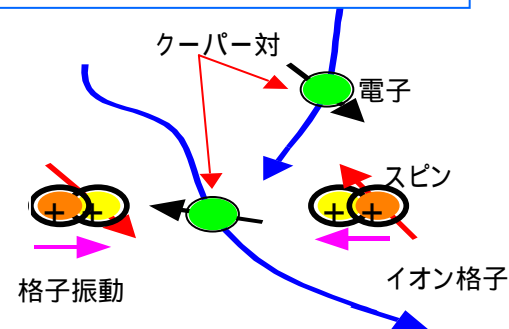


磁氣的相互作用か？

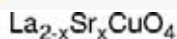
(中性子によるスピンダイナミクス観測)

電子-格子相互作用か？

(放射光・中性子による格子振動観測)

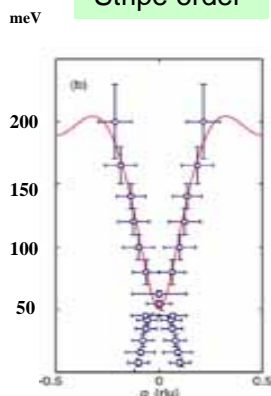
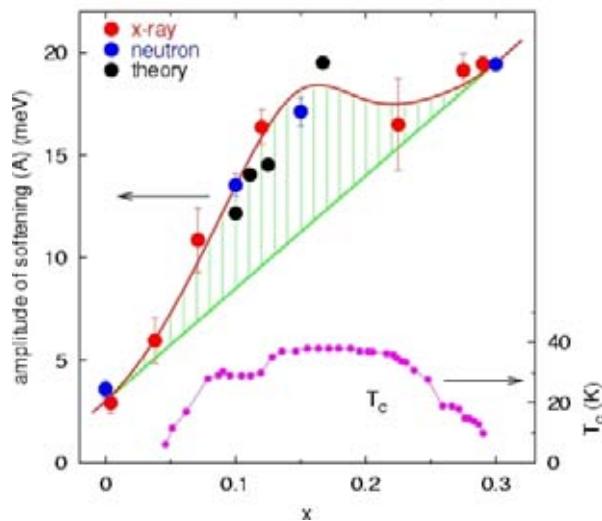


異なる超伝導体 LBCO (左)と YBCO (右)で類似の磁気励起スペクトルがパルス中性子散乱で観測された(ネイチャー誌 (7月3日号)に同時に発表された) ----> 激しい国際競争

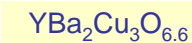
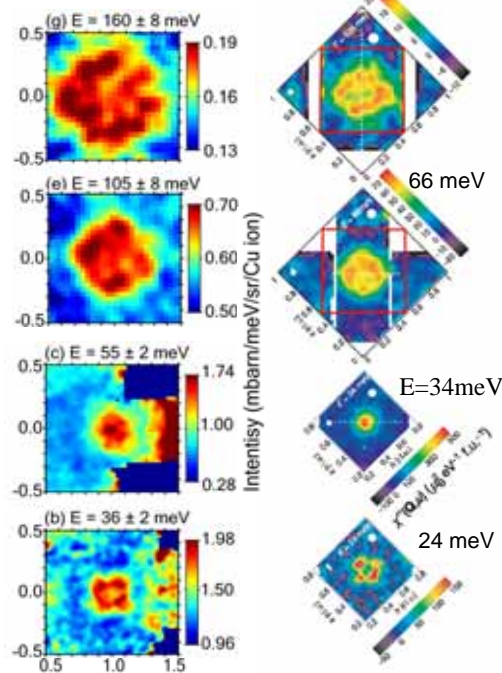


$x = 1/8$

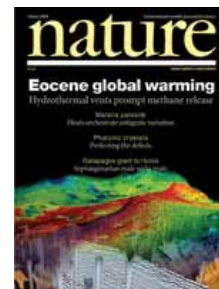
Normal state with Stripe order



(日米: Tranquada, Yamada)



Superconducting state



(英米: Hayden, Mook)

中性子(核散乱)、放射光(SPring-8)  
フォノンのソフトニング

中性子(磁気散乱, ISIS)  
「砂時計型」磁気励起スペクトル

# 中性子・放射光・イオンビームによる「燃料電池開発」

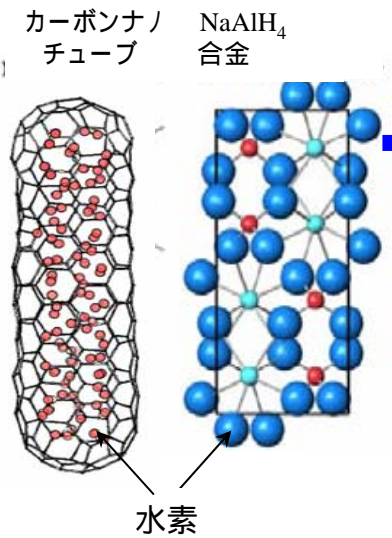
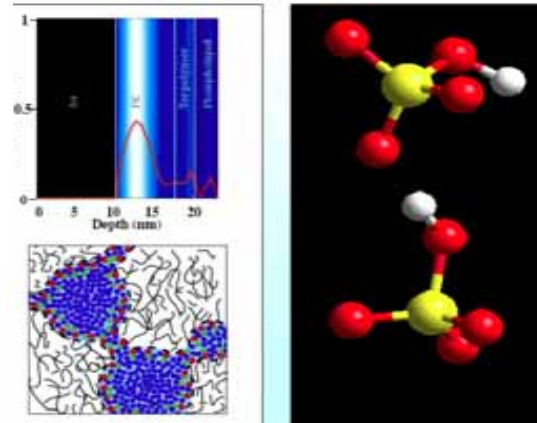
中性子ビームにより、燃料電池で最も重要な働きをする水素(プロトン)の位置と運動状態を観ることが可能。(先行例:2003年DOE水素エコノミー政策での基礎研究重視)

## 燃料電池3大開発要素

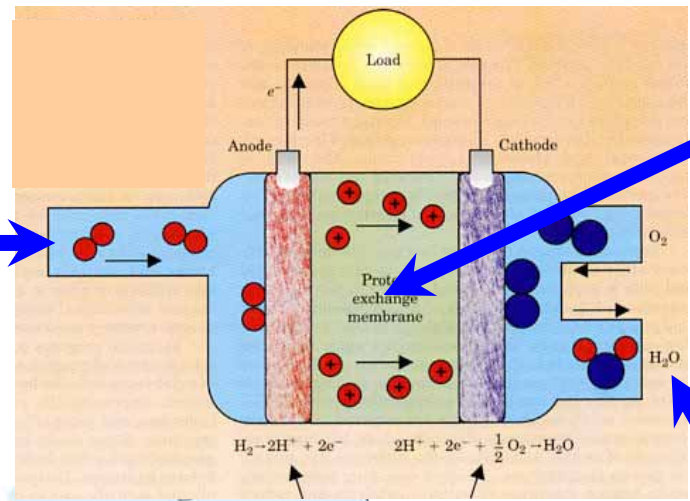
- 水素供給源(大吸蔵量・低温活性・長寿命水素吸蔵材料)
- プロトン伝導膜(高伝導率・長寿命プロトン透過高分子膜)
- 生成水除去(高排水能力)

燃料電池の入口から出口まで【産業的貢献】

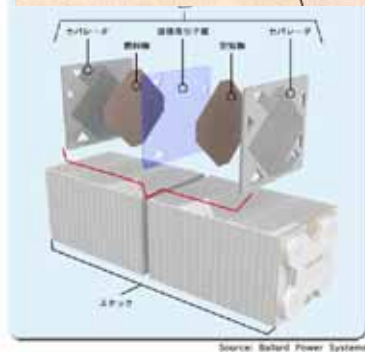
“The Hydrogen Economy”  
Physics Today (Dec. 2004) 39-44



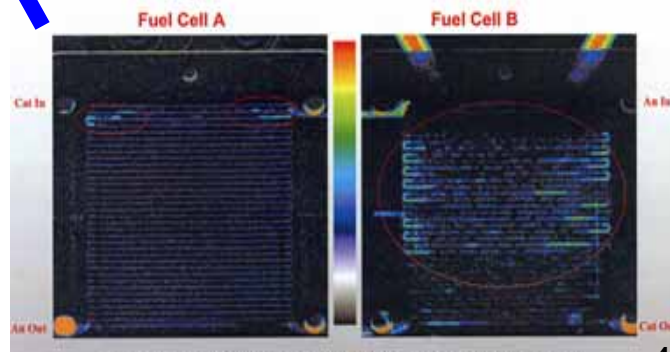
水素吸蔵材料開発  
(中性子・放射光回折・分光)



高分子膜透過機構  
解明と材料開発  
(イオンビーム加工、  
中性子・放射光回折・分光)



生成水の  
その場観察  
(中性子ラジオ  
グラフィ)





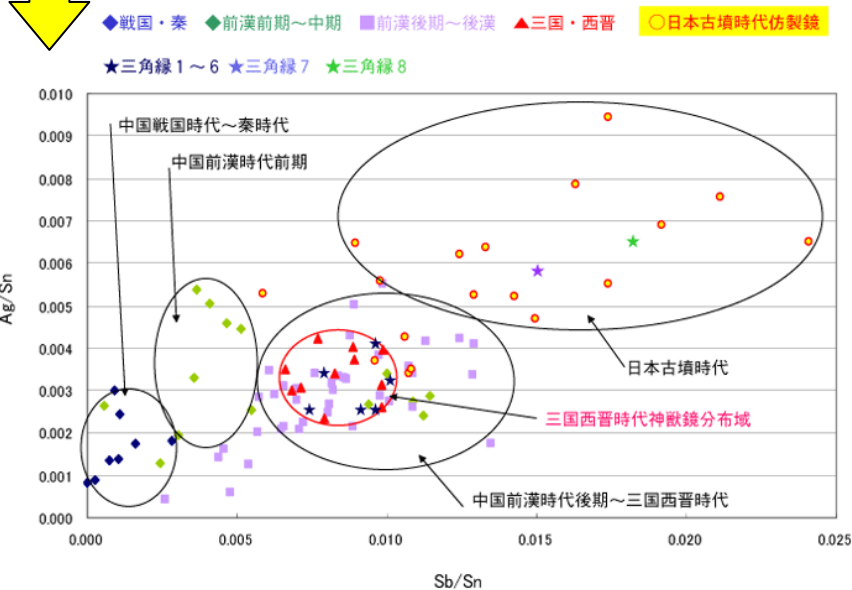
# 放射光・中性子による微量分析（青銅鏡の製造年代推定の試み）

非破壊で多元素分析(中性子:試料全体の分析、放射光:表面付近の微量分析)

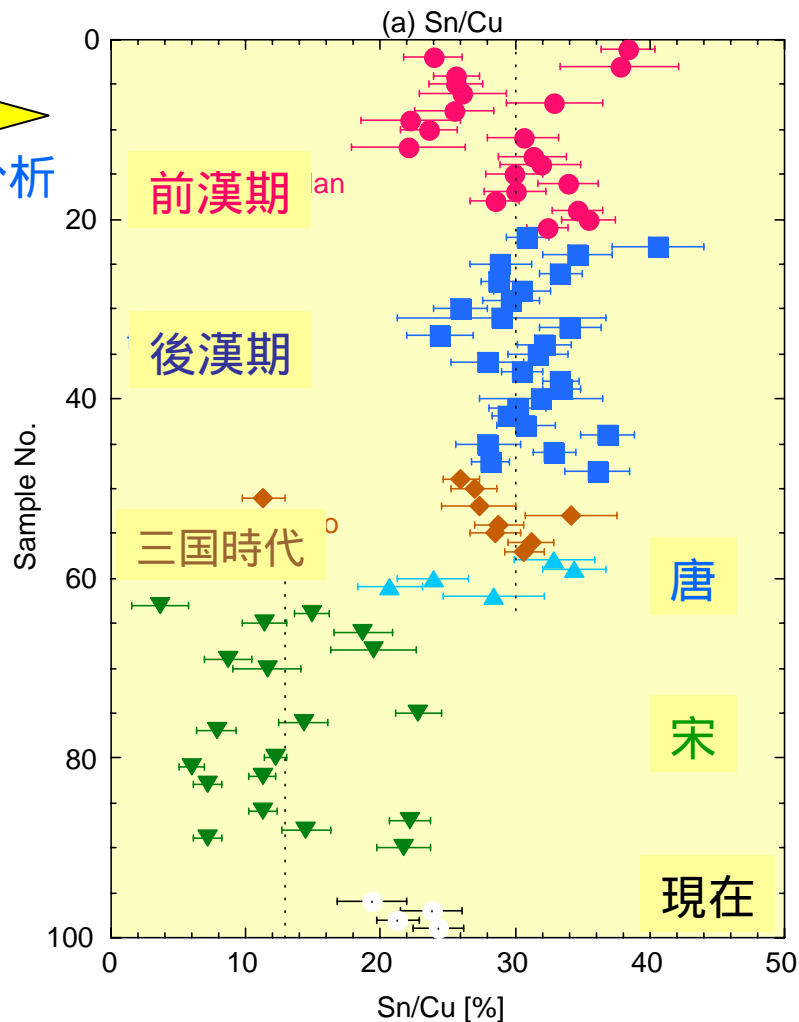


中性子ビーム  
 試料深さ全体の分析  
 (バルク分析)

放射光 試料表面付近の微量分析



SPring-8を利用した青銅鏡蛍光X線分析結果

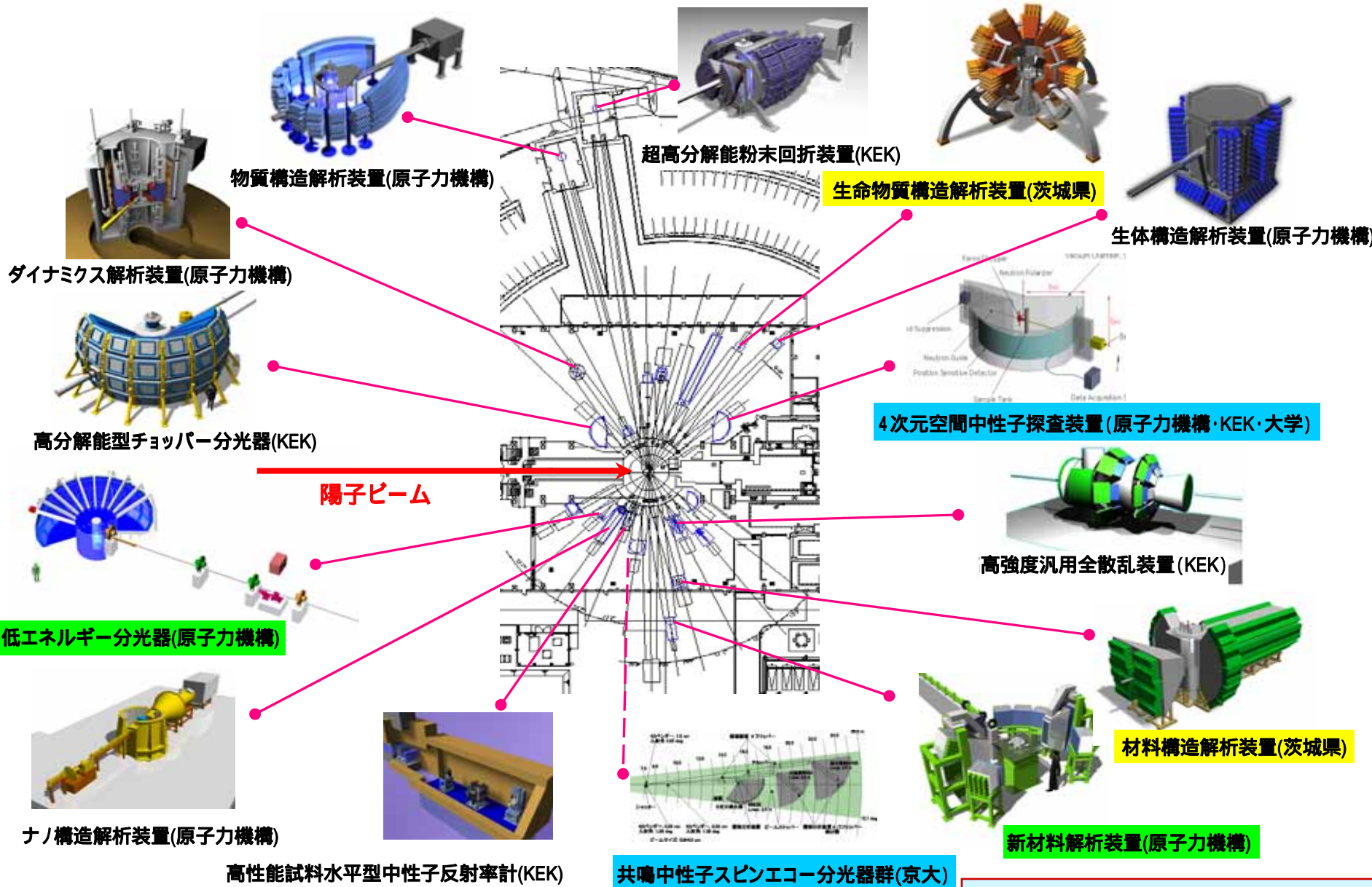


JRR-3 を利用した即発 線分析結果



# J-PARC/中性子源において設置計画中のビームライン機器

(      2006年度より新規整備予定の設置機器、      茨城県設置予定、      競争的資金を活用)



ユーザー数: 3,000-6,000人



## 産業利用支援体制の考え方

アドバイザー、コーディネータ、オペレーター等の支援者の配置

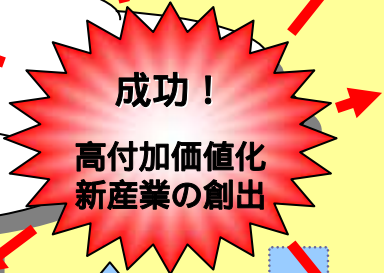
前処理からデータ取得・解析までの専門組織による分析サービスの提供(試料郵送方式:Mail-inサービスによる実験代行・分析)

トライアルユース・研究会開催等の利用促進プログラムの創設、公的組織による成功事例の「顕彰制度」によるインセンティブ付与

成果専有型産業利用に係る各種ルール・体制整備(窓口一本化、知的財産ポリシーの整備、機密保持・情報管理体制構築)

# 量子ビーム利用促進プログラム(2006年度創設予定)

## 研究機関・産業界



技術情報・  
トライアル  
コース情報

セミナー参加

情報の提供  
の要望

トライアルコース要望

計画作成

計画申請

計画実施の可否通知

トライアルコースの実行

実験成果および利用技術の取得

共用設備の本格的利用開始

利用促進・支援機関  
(放射線利用振興協会等  
の活用)

コーディネータ

要望の整理、  
計画打合せ

コーディネータ会議

提示計画の分析、  
トライアル日程調整

審査

審査委員会

量子ビーム施設(JRR-3)

試験設備の準備、  
運転・実験・解析の  
支援

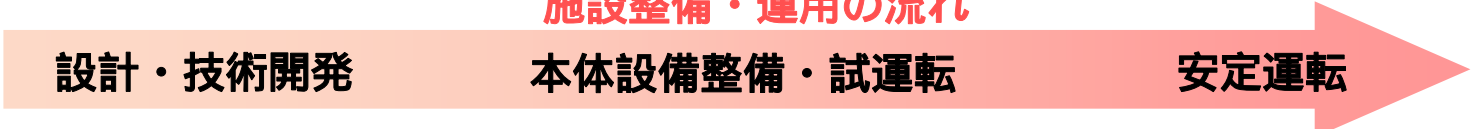
- 放射線利用の紹介  
パンフレット・技術誌配布 等
- 施設整備・利用への情報支援  
データベース提供 等
- 技術移転講座開設  
放射線利用技術セミナー  
研修生受け入れ制度 等

情報提供・支援

トライアルコース

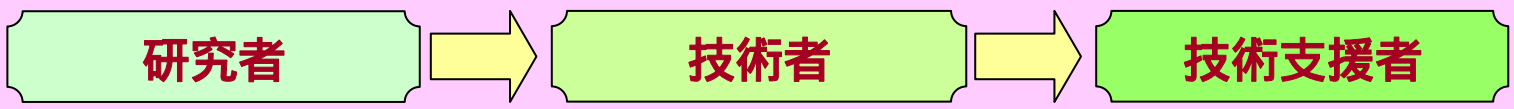
# プラットフォームを支える専門人材育成のあり方

施設整備・運用の流れ

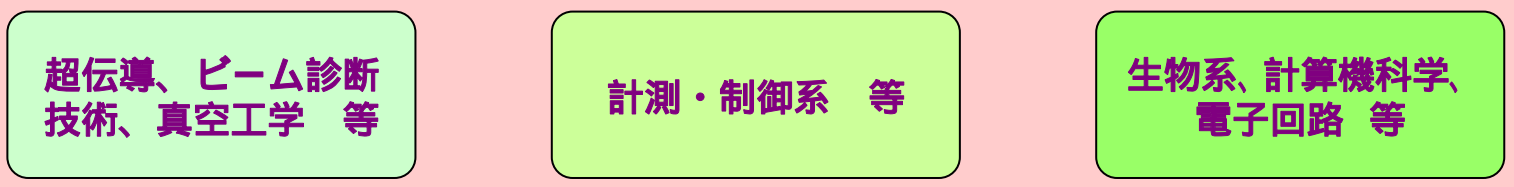


## 加速器関連の人材ライフサイクル

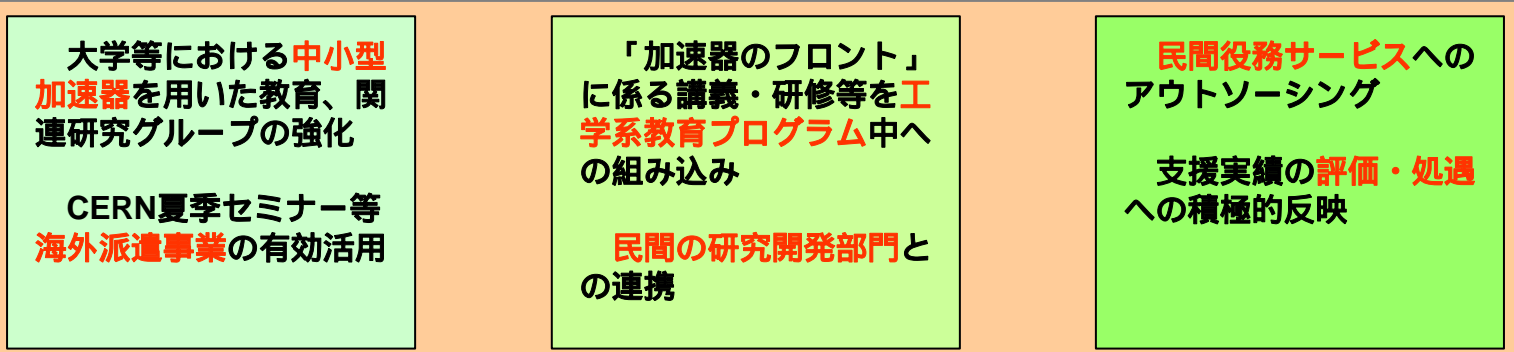
必要とされる  
人材



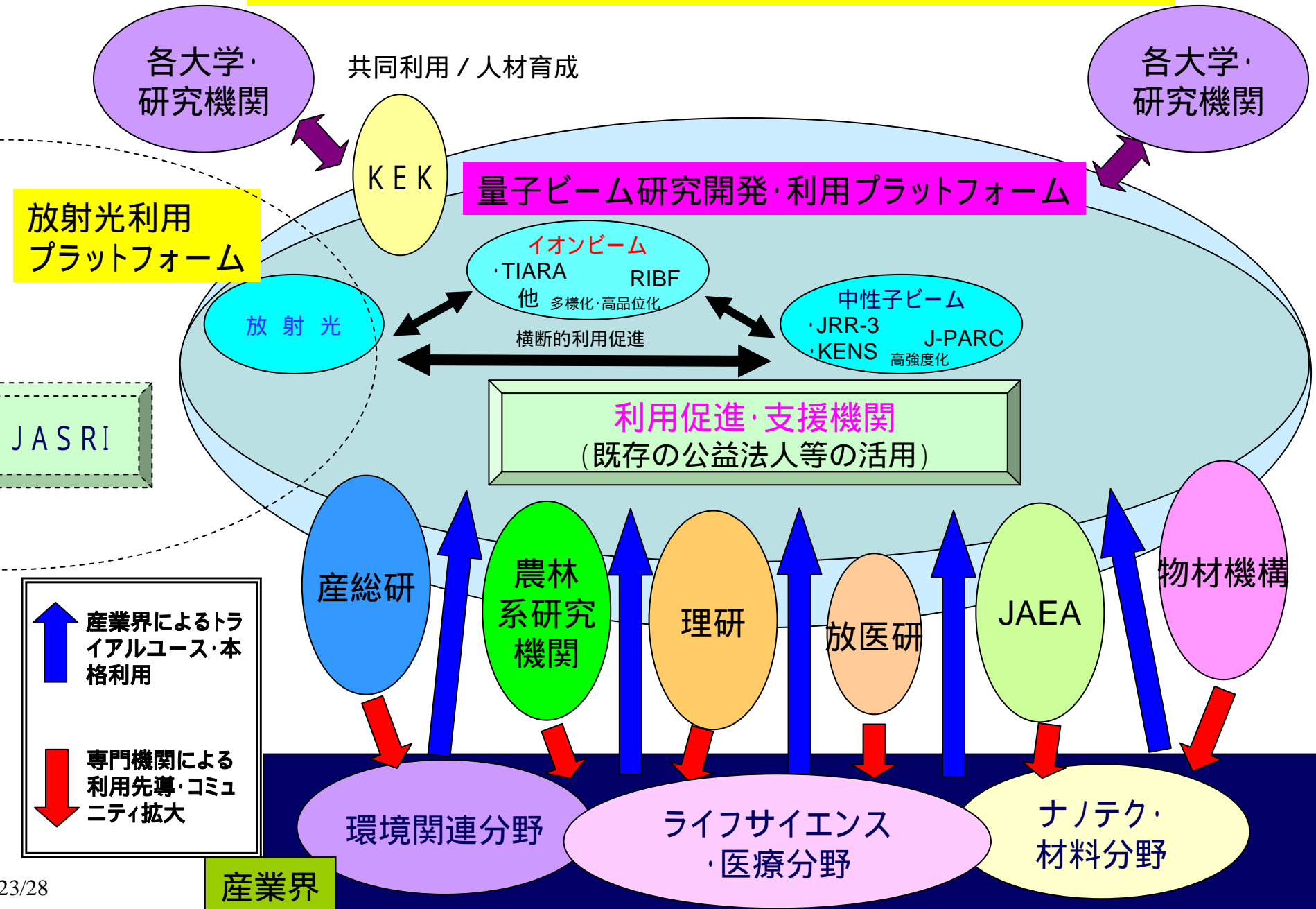
不足が顕著な  
分野



対応策



# 量子ビーム研究開発・利用の推進体制について

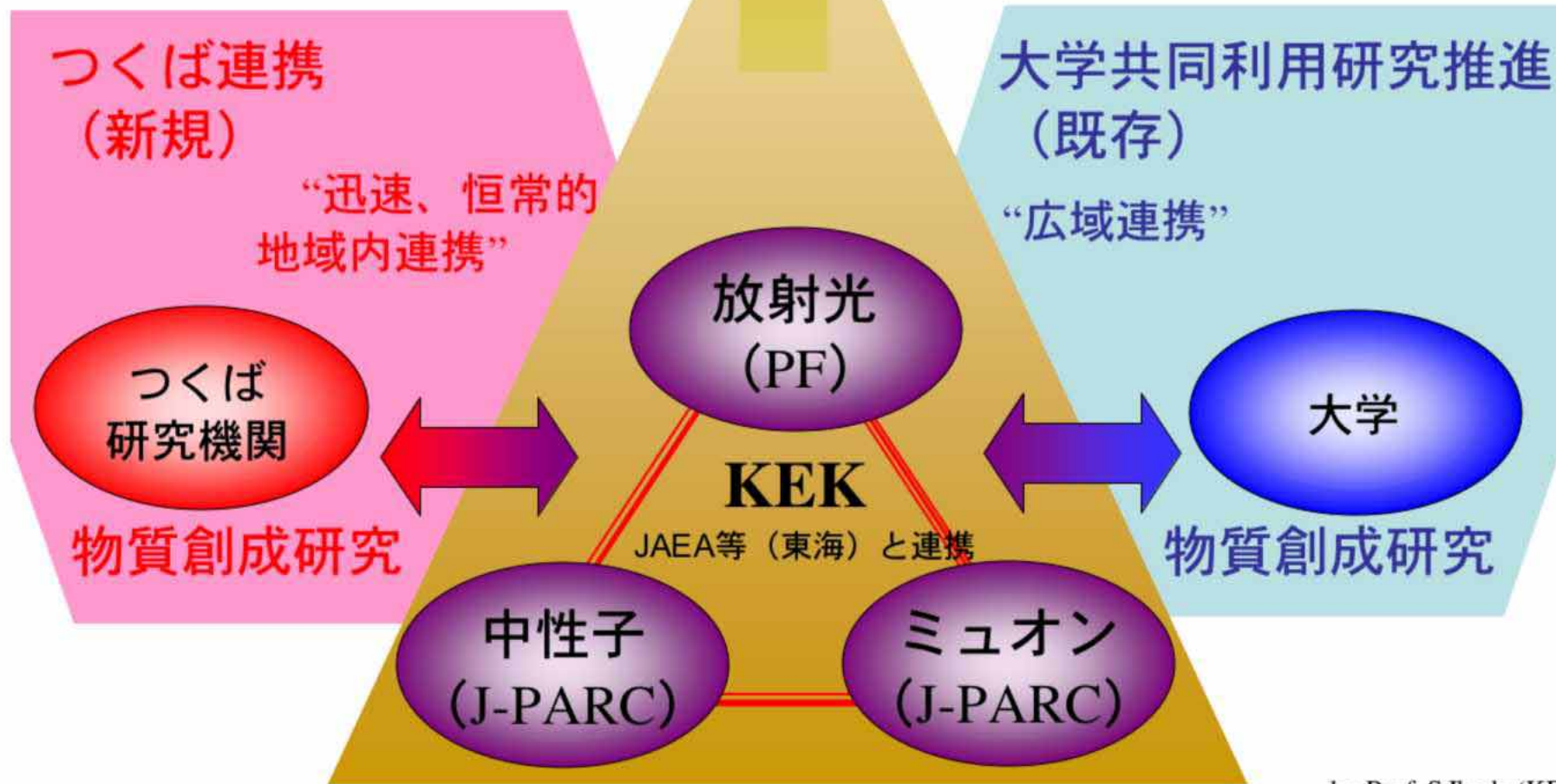




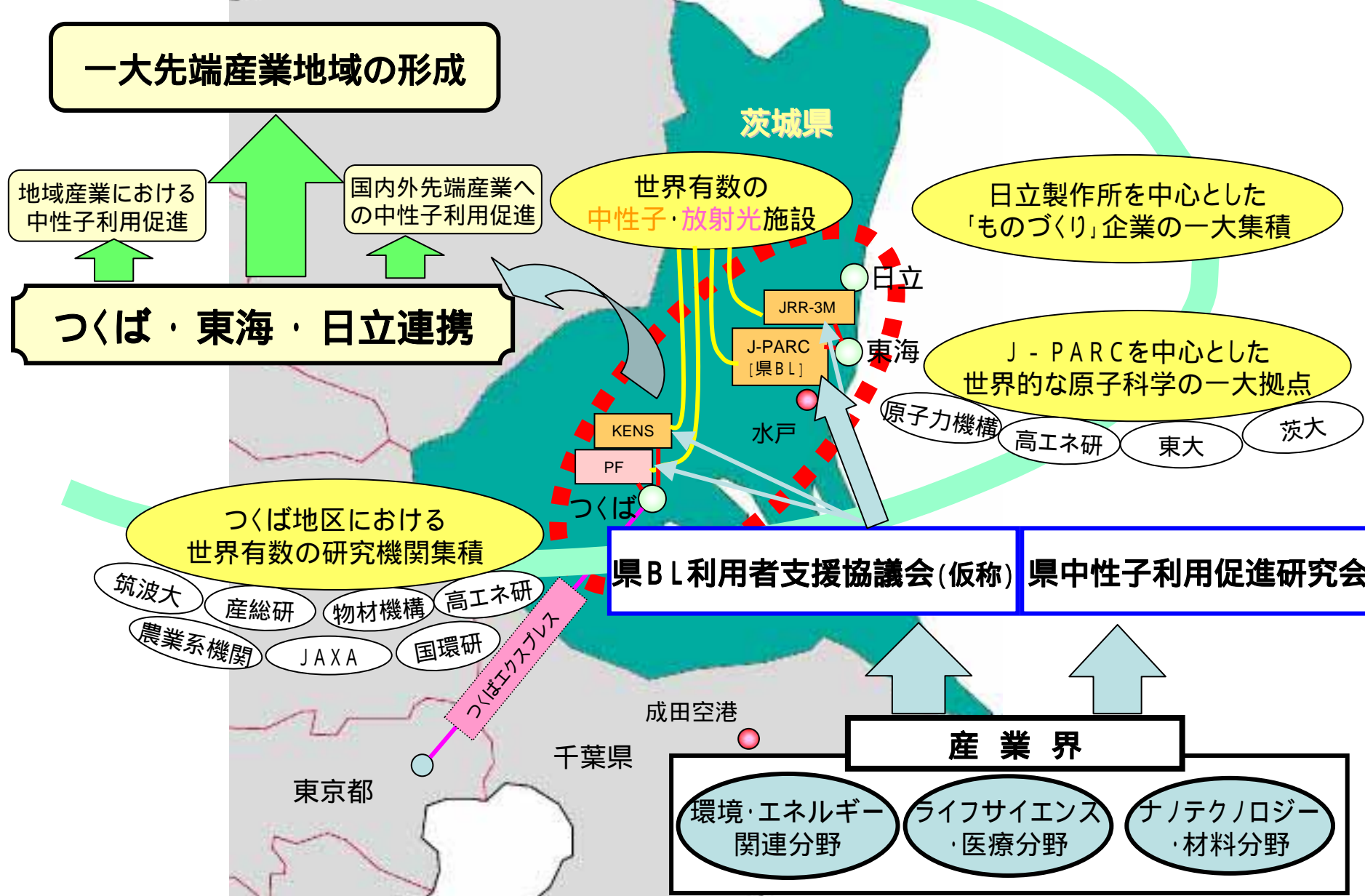
# プラットフォーム構築例①：つくばスパイラルー東海連携構想

つくば物質創成・構造研究  
スパイラル効果（二つの翼）

世界へ発信



# プラットフォーム構築例 : 茨城県「サイエンスフロンティア21」 茨城県における中性子利用の推進体制について



# 【参考資料1】米国におけるナノの戦略(エネルギー省DOE、商務省DOC)

## 「ナノサイエンス・ナノテク研究センター」 中性子 放射光施設に併設 (2003-2008)

*The 21st Century Nanotechnology Research and Development Act*  
(21世紀ナノテクノロジー研究開発法、ブッシュ大統領署名 2003.12.3成立)

*USDOE Office of Science Strategic Plan (Feb. 2004)*

ローレンスバークレー研究所  
LBNL(カリフォルニア)

Molecular Foundry  
Lawrence Berkeley National Laboratory



Center for Nanoscale Materials  
Argonne National Laboratory



アルゴンヌ国立研究所  
ANL(シカゴ)

Center for Functional Nanomaterials  
Brookhaven National Laboratory



ブルックヘブン国立研究所  
BNL(ニューヨーク)

Center for Integrated  
Nanotechnologies  
Sandia National Laboratories and  
Los Alamos National Laboratory



ロスアラモス国立研究所  
LANL(ニューメキシコ)



Center for Nanoscale Materials Sciences  
Oak Ridge National Laboratory



オークリッジ国立研究所  
ORNL(テネシー)

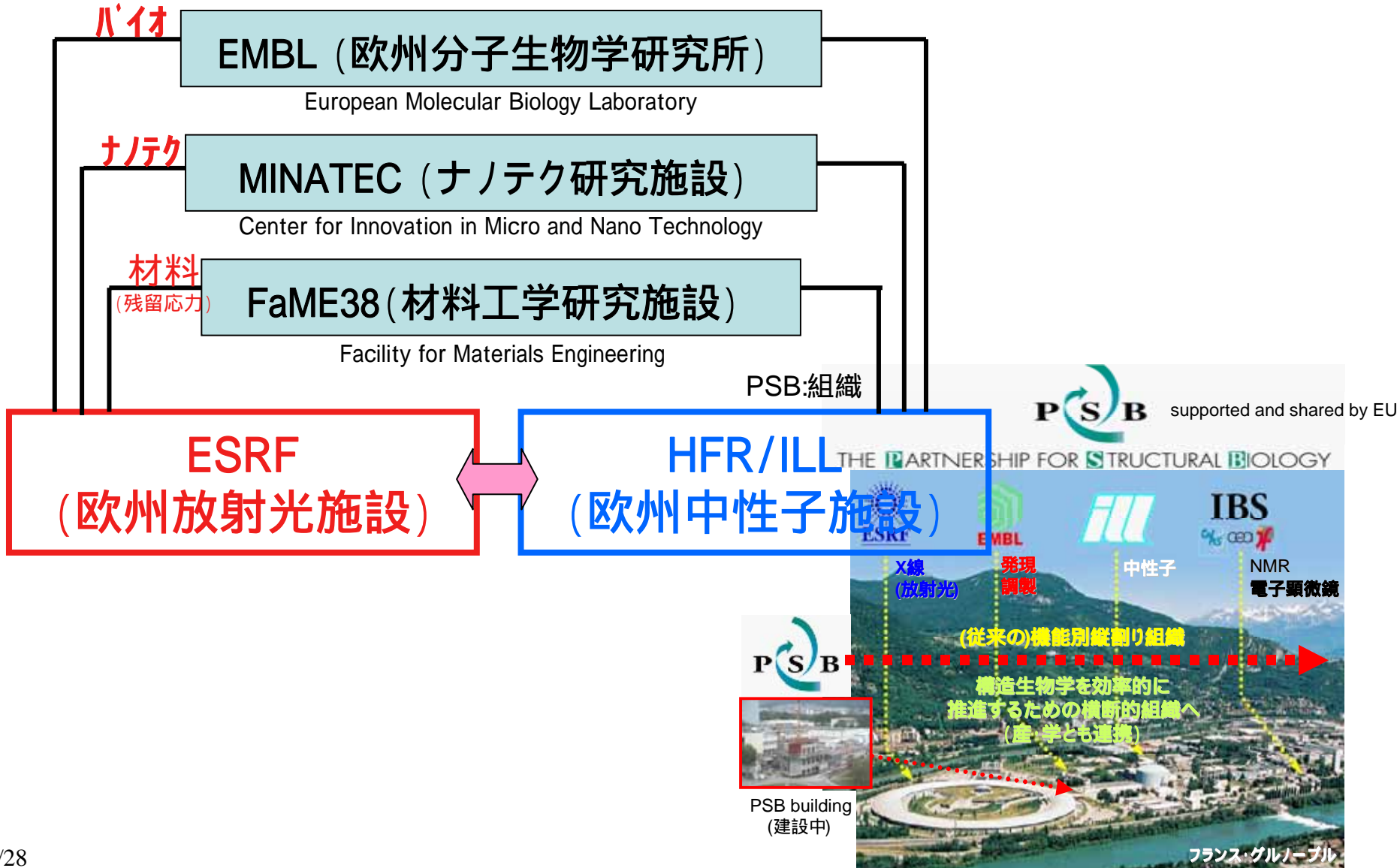
< 燃料電池開発拠点  
(中性子ラジオグラフィ) >  
国立標準技術研究所  
NIST(メリーランド)/DOC





# 【参考資料2】欧州におけるバイオ・ナノ・材料の戦略

(仏・グルノーブル地区)



## 関係ホームページアドレス

量子ビーム研究開発・利用推進検討会

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/010/](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/010/)

J-PARC

<http://j-parc.jp/>

RIビームファクトリー

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

中性子利用

<http://nsrc.tokai-sc.jaea.go.jp/>

### < 連絡先 >

文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課

量子放射線研究推進室 担当: 安田、桂

〒100-8959 東京都千代田区丸の内2-5-1

Tel: 03-6734-4115

Fax: 03-6734-4121

E-mail: [ryasuda@mext.go.jp](mailto:ryasuda@mext.go.jp)

[skatsura@mext.go.jp](mailto:skatsura@mext.go.jp)