

産業界の中性子利用 に対する期待

(株)日立製作所
長我部信行

中性子を利用する主要研究分野

研究分野	学術研究分野	産業利用分野
非晶質・液体	物性物理, 化学物理, 材料工学, 溶液化学, 金属工学, 反応化学, 宇宙・地球科学	光学材料, アモルファス磁性体, 光磁気ディスク, 金属ガラス材料, エネルギー関連材料
高分子・ソフトマター	高分子化学, 溶液化学, 表面化学, 反応化学, 合成化学	高分子触媒, 食品工業, プラスチック・ゴム材料, 石油化学工業, 農林水産業
磁性体・誘電体	強相関物理, 磁性物理, 超伝導物理, 誘電体物理	超電導磁石, スピンエレクトロニクス材料, エネルギー関連材料
生体物質および生体関連物質	構造生物学, 薬学, 農学	製薬, 食品, 農林水産業
機能・構造材料	材料工学, 金属工学, 機械工学, 触媒化学, 表面化学, 農学, 考古学, 宇宙・地球科学	エネルギー関連材料, 重工業, 鉄鋼, 材料産業, 建設土木
原子力・基礎物理	原子核物理, 核化学, 原子力基礎データ, 中性子基礎物理	原子力燃料, 中性子光学デバイス

産業における中性子の適用対象と技術

産業分野	適用対象	適用技術
電機・電器	MRAM, 光磁気ディスク 磁気記録ヘッド, 液晶	粉末回折, 偏極回折, 反射率計
化学・繊維	ディスプレイ用機能性薄膜 高分子触媒, 機能性プラス チック, ゴム, 半導体素材 高張力繊維	反射率計, 小角散乱, 粉末回折, ドーピング
鉄鋼・金属	超高張力鋼, 燃料電池用水素 貯蔵容器, Ti-Al合金, 磁石	小角散乱, 偏極回折, 残留応力, 集合組織
自動車・部 品	エンジン, 燃料電池, 自動車 部品	残留応力, 集合組織, 粉末回折,
重工・機械	発電プラント, 建設機械	残留応力, 集合組織
電力・ガス	発電プラント, 燃料電池	残留応力, 集合組織, 粉末回折
建設・土木	コンクリート構造, 橋梁	ラジオグラフィ
製薬・食 品・化粧品	薬品, 機能性食品, 機能性化 粧品	単結晶構造解析, 粉末回折

日立グループにおける中性子利用実績

1. 残留応力

原子力機器, 自動車部品, 建設機械

2. 集合組織

原子力機器

3. 微粒子・薄膜の磁気特性

磁気テープ, 磁気ディスクヘッド, 磁石

4. 誘電体構造解析

コンデンサー

5. ラジオグラフィ

電力用ポンプ, 建設機械

6. 界面構造

半導体用絶縁膜

中性子回折の適用例

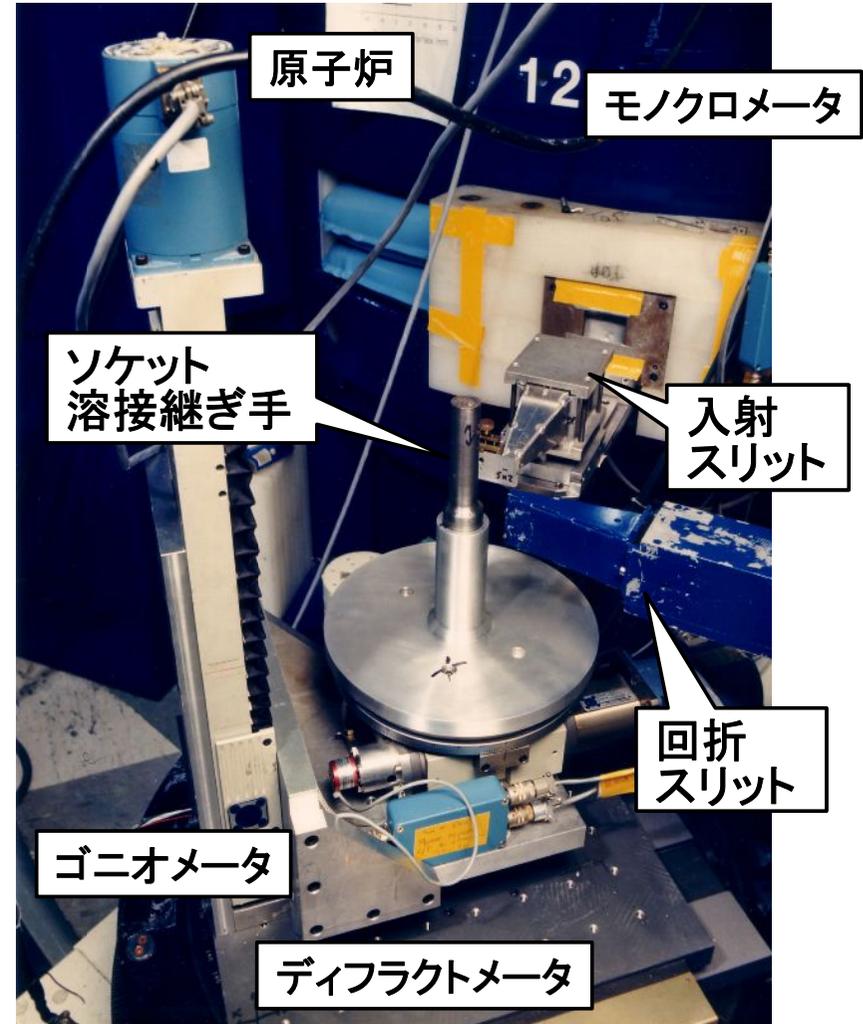
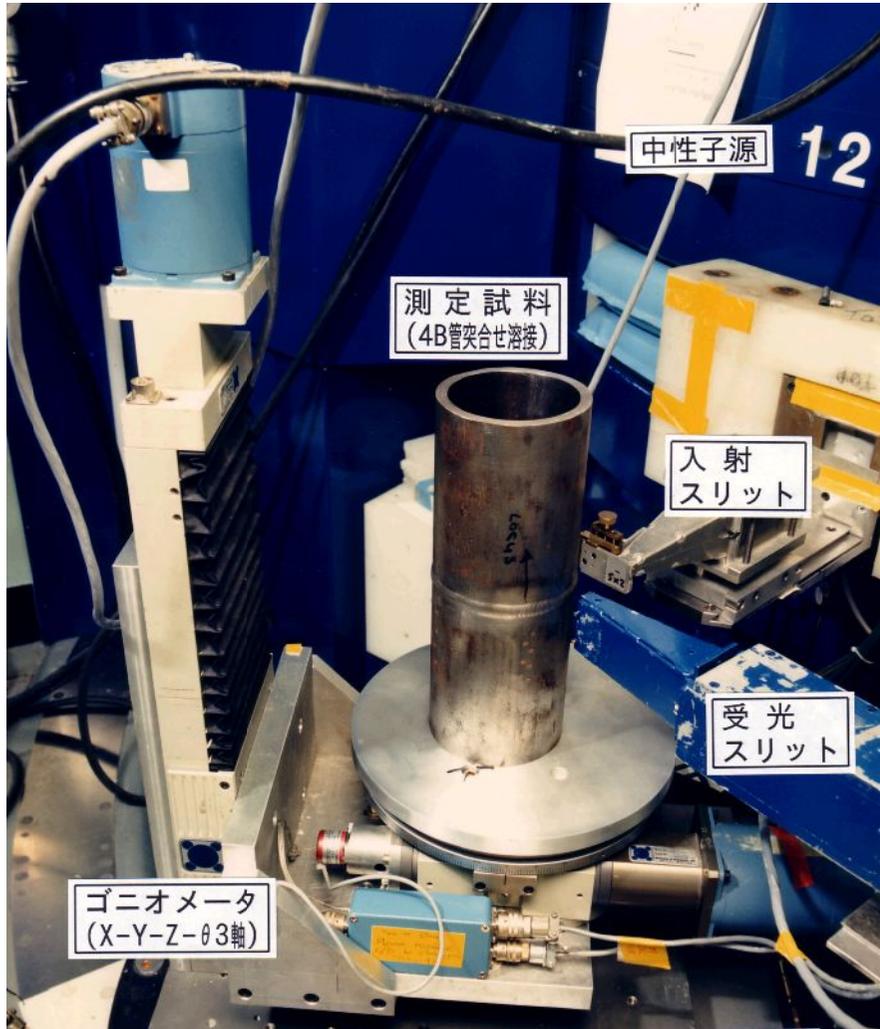
残留応力測定

- ・炭素鋼ソケット継ぎ手
- ・炭素鋼突合せ溶接継ぎ手
- ・蒸気発生器曲げ伝熱管(Incoloy-800)
- ・Zr-2.5Nb合金の電子ビーム溶接した圧力管
- ・曲げ塑性変形させた炭素鋼板(SM400)
- ・SiC析出物強化アルミニウム複合材料
- ・Zr-2.5Nb圧力管のロールジョイント
- ・冷し嵌めしたアルミニウムのリングとプラグ
- ・摩擦圧接した炭素鋼継ぎ手
- ・ショットピーニングおよびWJP表面層

集合組織の測定

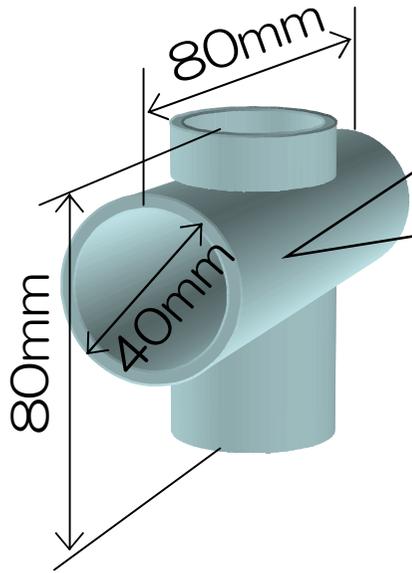
- ・Zr-2.5Nb合金製圧力管およびアルミニウム合金

き裂進展に伴う残留応力の再分布



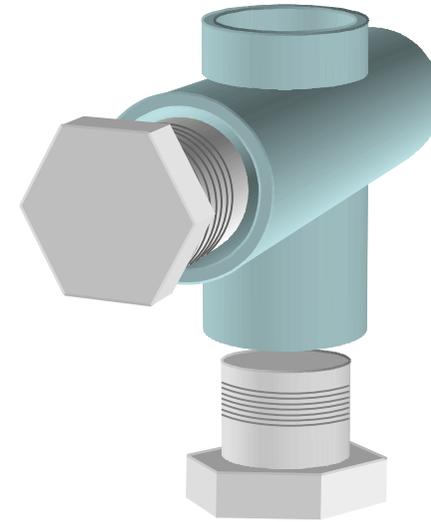
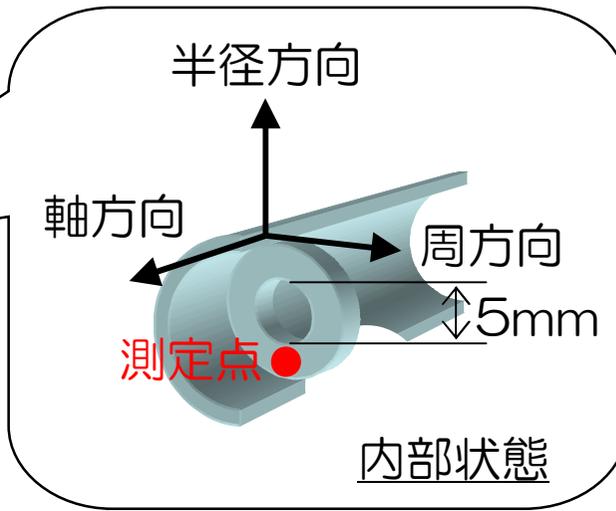
炭素鋼突合せ溶接継ぎ手およびソケット
溶接継ぎ手の残留応力測定状況
(Chalk River Lab., AECL)

アルミダイカスト自動車部品の組立前後 における内部応力変化



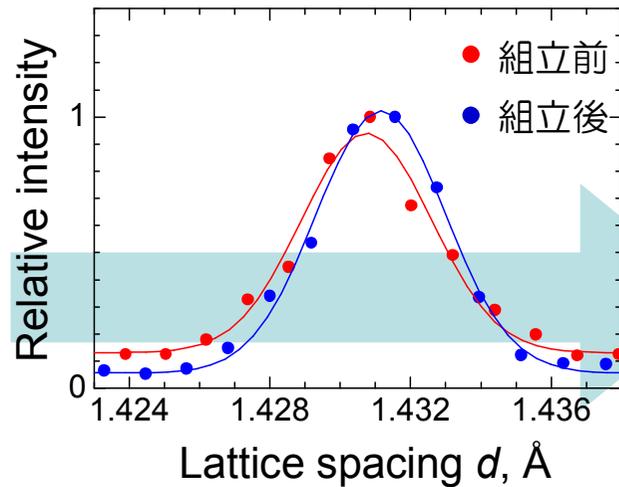
組立前

軸方向 引張 4 MPa
半径方向 圧縮 15 MPa
周方向 圧縮 5 MPa



組立後

軸方向 引張 54 MPa
半径方向 引張 61 MPa
周方向 引張 59 MPa



周方向のAl(220)の格子面間隔変化

J-PARCにおける残留応力測定

高性能化, 高信頼性, 長寿命化などを目指した製品・材料の開発研究を行い, 安全で快適な社会創りに貢献

現在 (JRR-3)

- 最小測定体積 : 2mm×2mm×2mm
- 1 プロファイル測定時間 : 6時間程度
- 応力分解能 : ±30MPa程度 (鉄鋼)
- 測定対象 : モデルサンプル

将来 (J-PARC)

- 最小測定体積 : (1mm)³
- 1 プロファイル測定時間 : 20分程度
- 応力分解能 : ±15~20MPa程度
- 測定対象 : 実機 (稼動中を含む)

産業応用

自動車エンジン



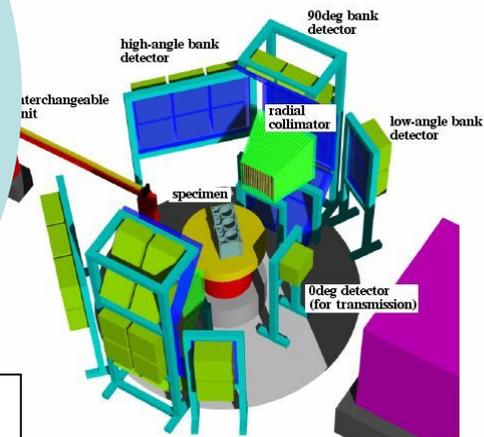
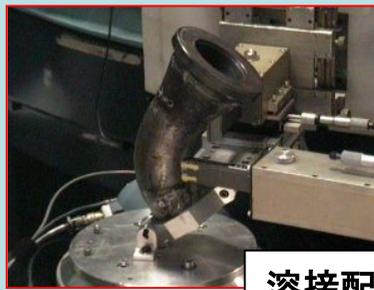
ギア



ジェットエンジン



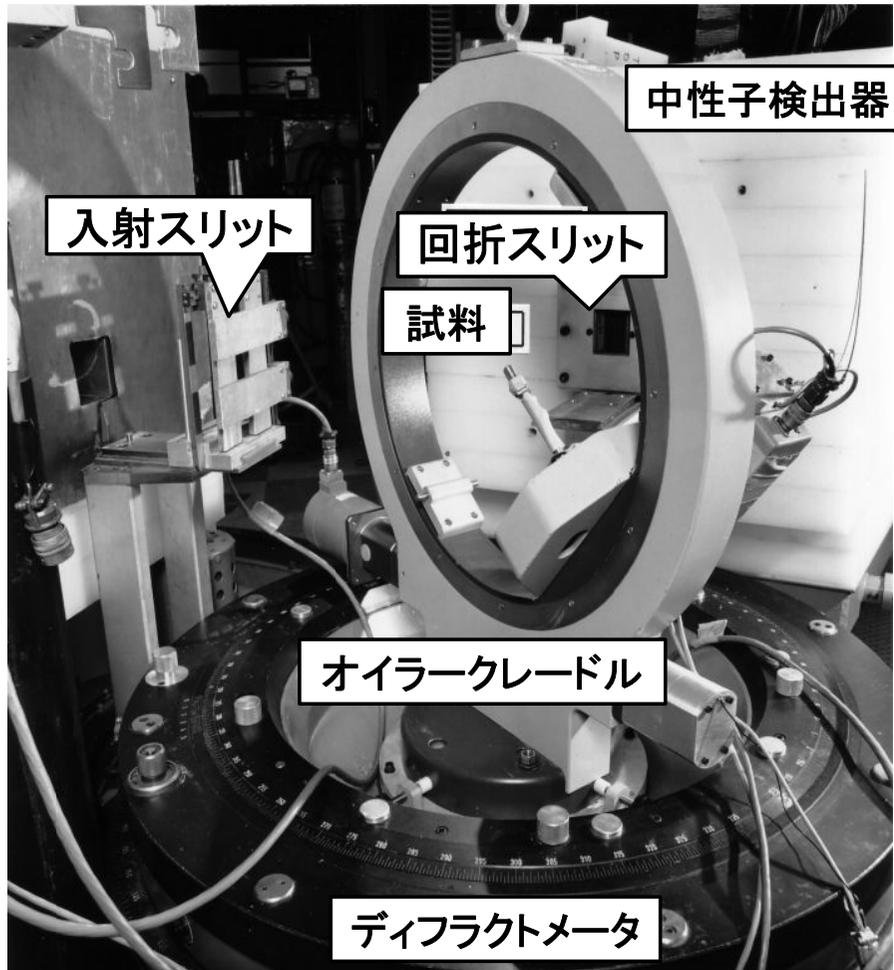
溶接配管



中性子残留応力解析装置 RESA (JRR-3内設置)

パルス中性子残留応力解析装置

集合組織の測定

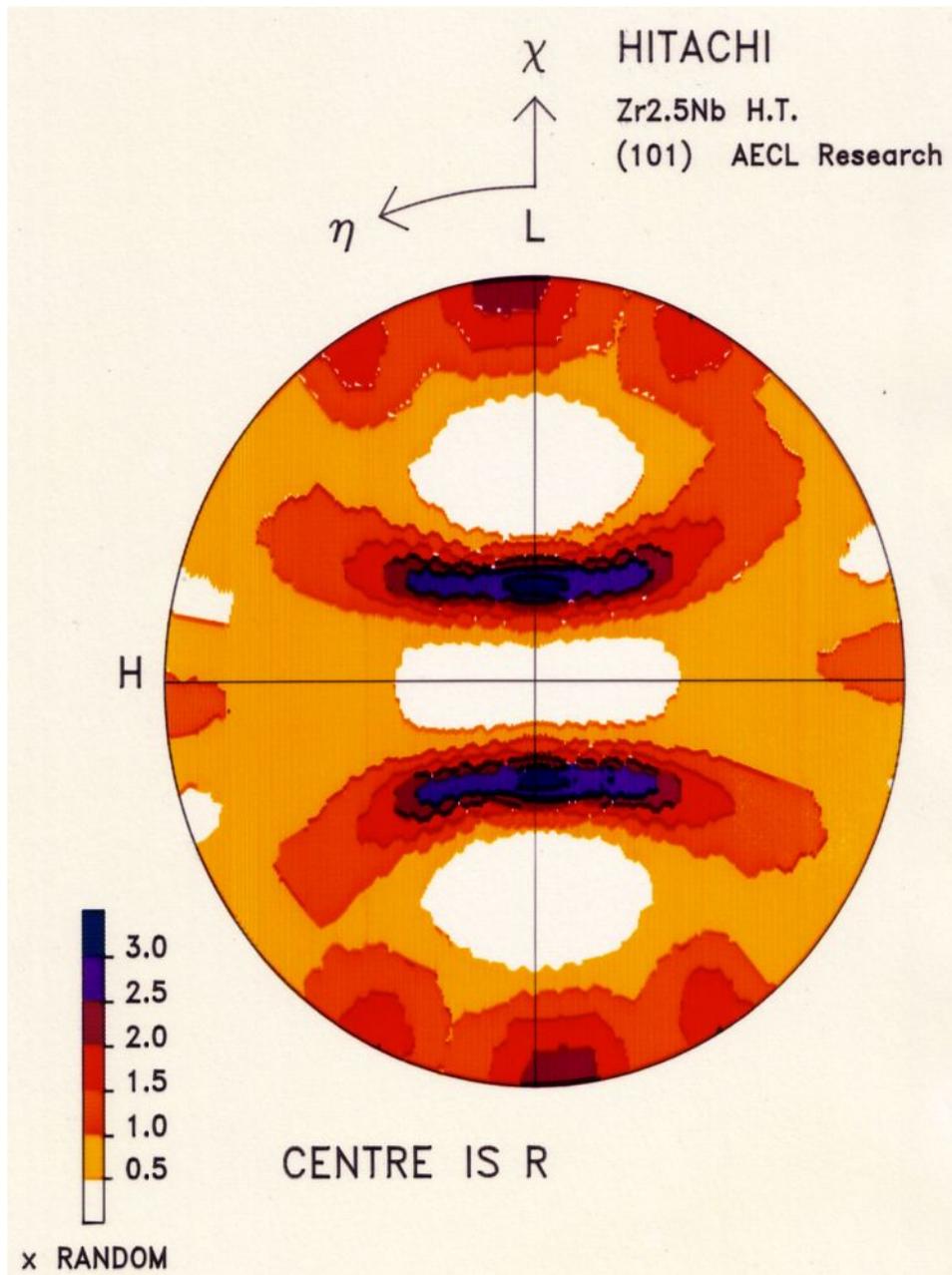


大きいスリットで試料全体を照射し
透過法により短時間測定



集合組織測定用の
試料と試料ホルダ

中性子回折による集合組織測定の光学系

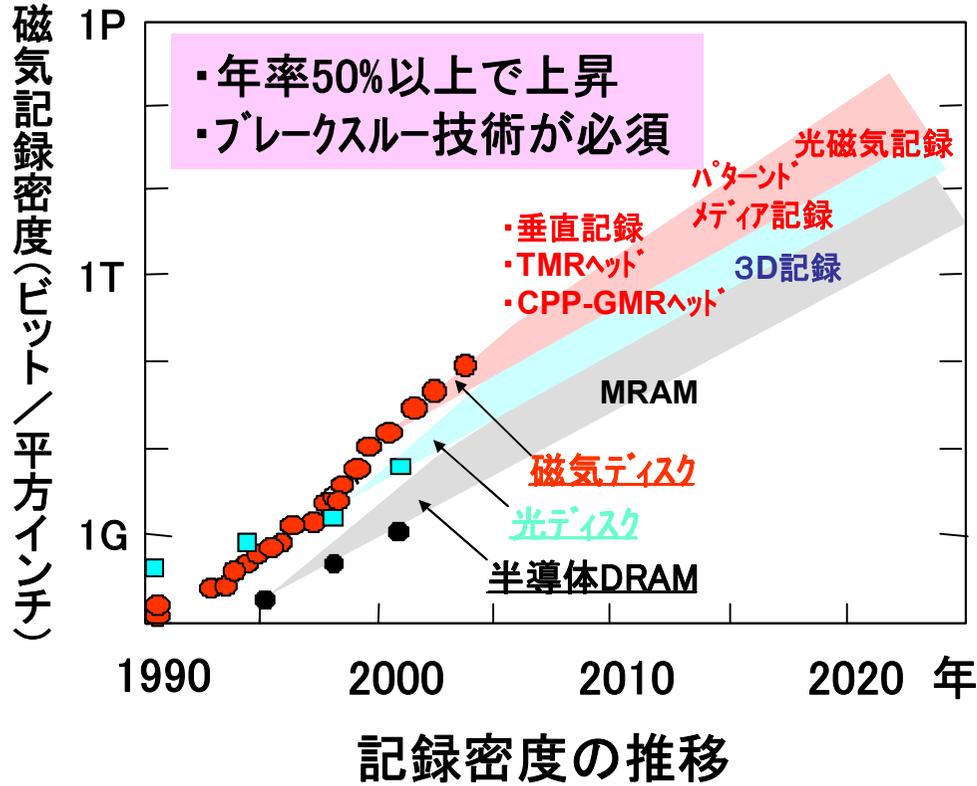


X線に比して約1/5~1/10の短時間で測定可能

J-PARC/MLFではTOF (飛行時間法) による測定のため多数の回折面の集合組織を同時に測定可能

新型転換炉用Zr-2.5Nb合金の(101)極点図

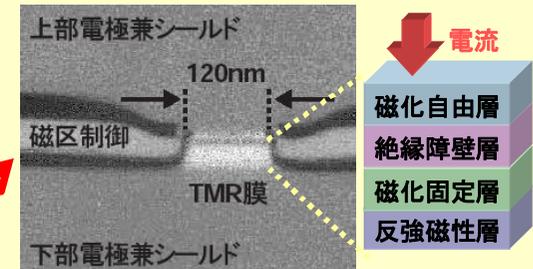
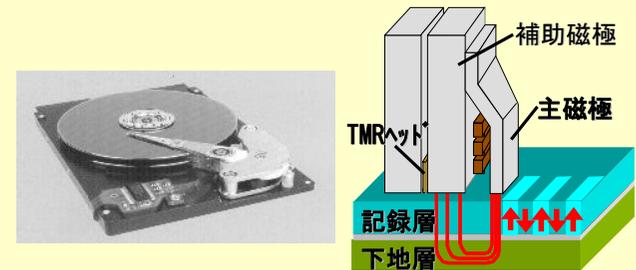
ナノ磁性・ナノデバイス開発



中性子による磁性層の構造・特性評価

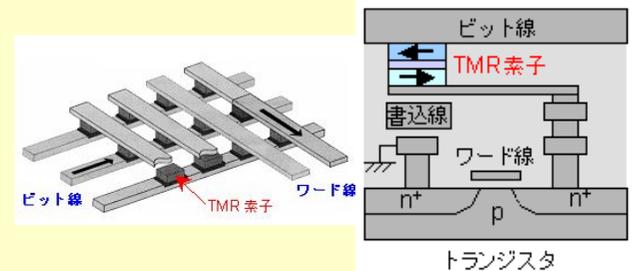
磁気記録やMRAM分野で多用する磁性層の磁気構造の解明により高度な磁気構造制御を実現し、次世代磁気ディスク装置を開発

磁気ディスクの構造 (垂直記録とTMRヘッド)



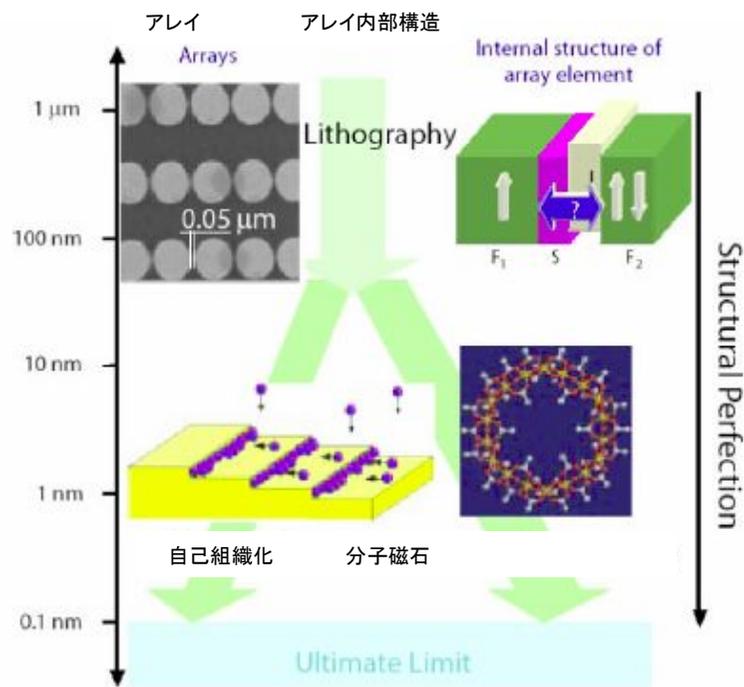
TMRヘッドの観察像と積層構造

次期半導体DRAMの構造 (MRAM: TMR構造利用)



ナノ磁性・ナノデバイス開発

中性子は磁気モーメント(物質中の微小磁石)の位置と運動状態を正確(定量的)に観ることができるため、磁気ディスクや磁気ドットなどの新しい磁気ナノデバイスや高密度磁気記録媒体の開発に貢献する



磁気薄膜・多層膜の磁気構造とスイッチング現象観測
(J-PARC反射率計)

アレイ(磁気ドット)の磁区構造解析 (J-PARC偏極中性子散乱装置)

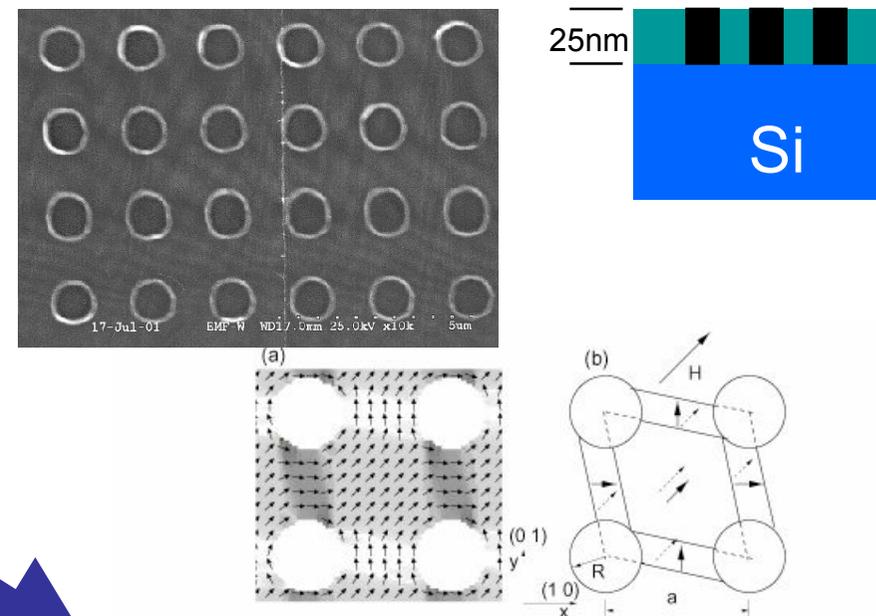
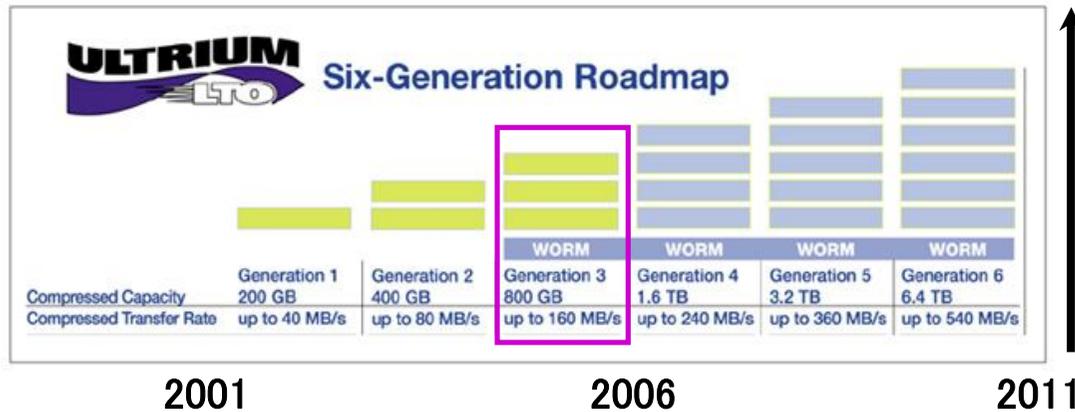


FIG. 3: Spin configuration using micromagnetic simulation (a) and schematic of domain structure (b). Dashed arrows in (b) represent a model of uniform magnetization between antidots.

- ・スピントロニクス
- ・磁性ナノデバイス
- ・超高密度記録

ナノ磁性粒子窒化鉄の磁気構造解析

銀行系・証券系用の磁気記録テープは**高密度・高信頼性**

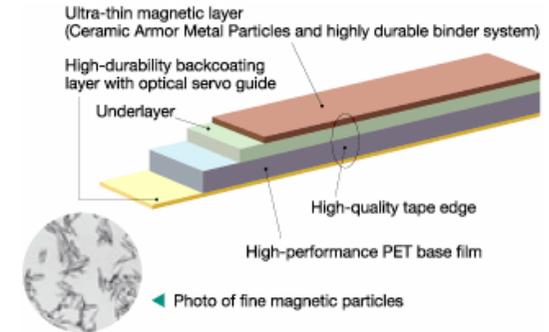


現状は第3世代800GB

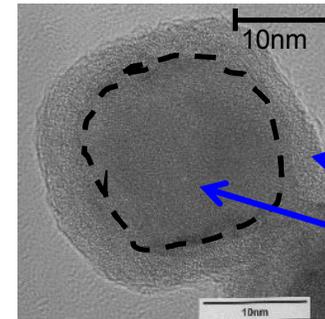
ハードディスクとの記録容量とスピードの比較

年次	2001	2006	2011
磁気テープ (TB)	0.1	1.0	10.0
ハードディスク (TB)	0.03	0.3	3
容量比(Tape/HDD)	3.3	3.3	3.3
スピード比 (Tape/HDD)	0.04	0.04	0.04

記録容量 ↑



第6世代の6.4TBを実現するのに最も有望な磁性体は窒化鉄微粒子



磁化は大きく
粒径は小さくしたい

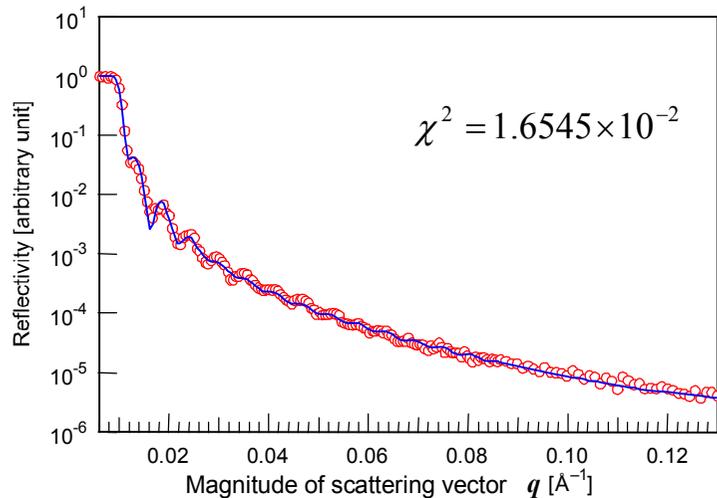
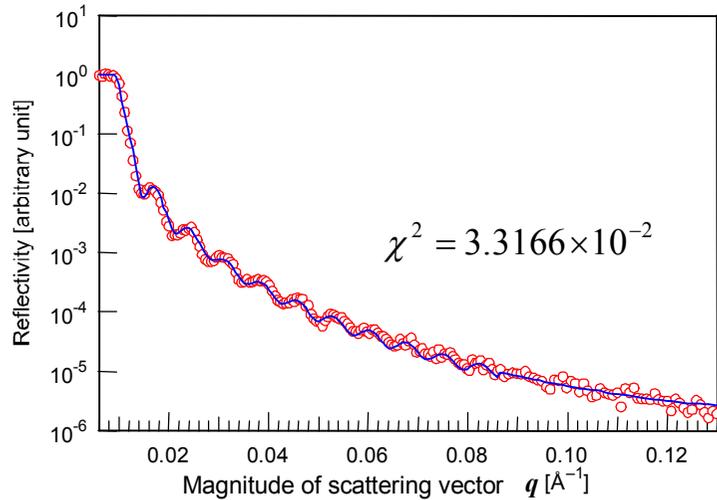
酸化防止膜
窒化鉄微粒子

酸化防止膜厚に影響されない
磁化評価を偏極中性子を使って測定

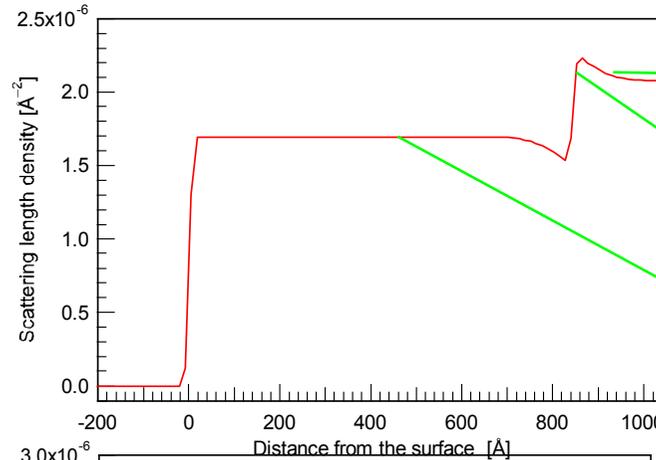
粒径19nm, 17nmでは磁化の差なし
粒径10nmまで測定し磁化と粒径サイズの相関を明らかにし、**限界サイズ同定**

ポーラスシリコキサン樹脂膜の界面構造

半導体回路における層間絶縁膜へのメチルシルセスキオキサン(CH3SiO1.5)系細孔構造適用による低誘電率化



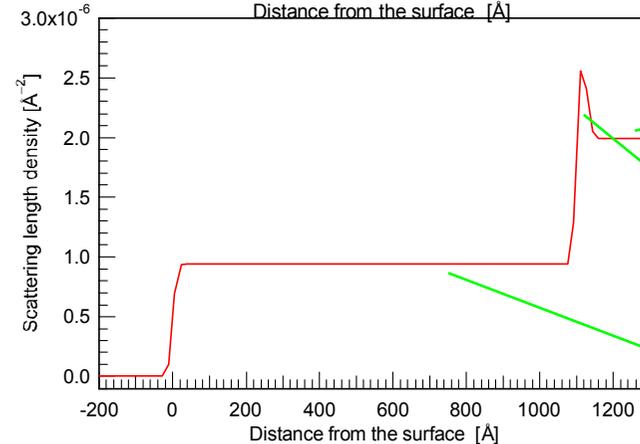
反射率計による測定結果



Si基板の密度
(2.333 g/cm^3)

SiO₂界面層の密度
(1.576 g/cm^3)

シリコキサン樹脂膜の密度
(1.488 g/cm^3)



Si基板の密度
(2.240 g/cm^3)

SiO₂界面層の密度
(1.636 g/cm^3)

シリコキサン樹脂膜の密度
(0.812 g/cm^3)

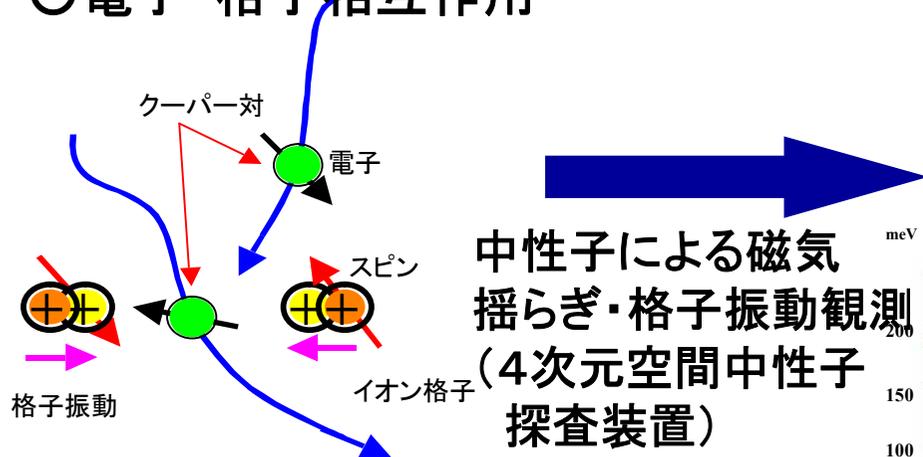
SiO₂界面層の存在の発見と密度差の定量的測定

銅配線層から層間絶縁膜への銅の拡散を抑制するバリアメタル構造の開発

高温超伝導機構の解明と材料開発

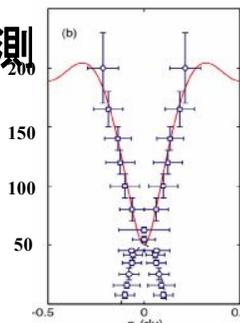
2大超伝導機構

- 磁氣的相互作用 + 格子ひずみ
- 電子・格子相互作用



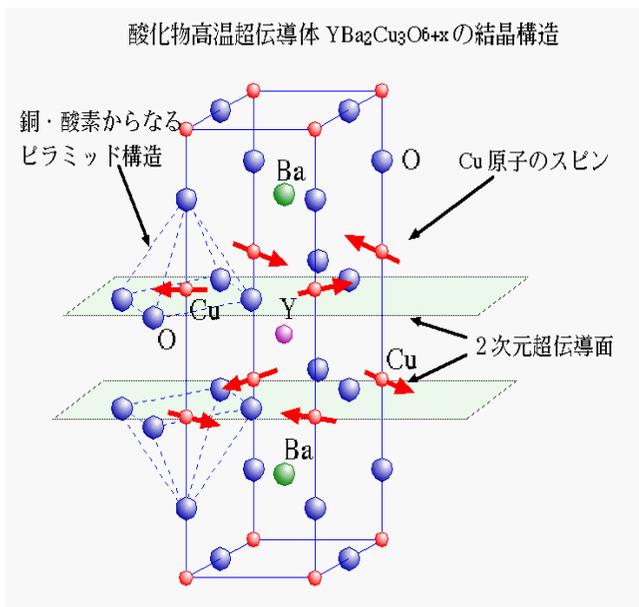
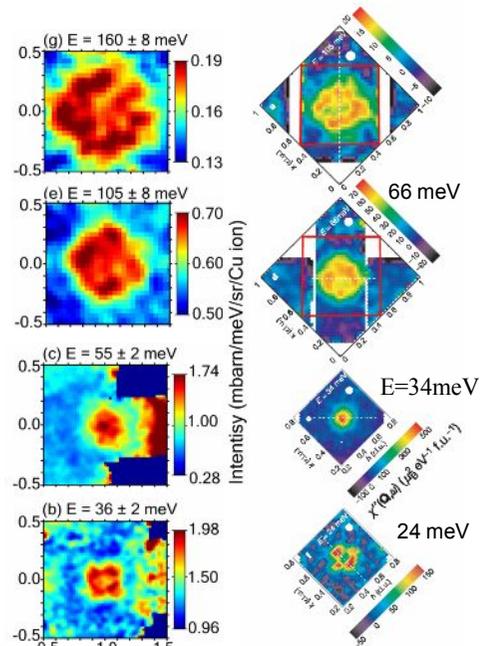
異なる超伝導体LBCOとYBCOで類似の磁気励起スペクトルがパルス中性子散乱で測定された

$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$
 $x = 1/8$
Normal state with Stripe order



(日米: Tranquada, Yamada) (英米: Hayden, Mook)

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$
Superconducting state



高温超伝導機構の解明によるより高温の超伝導材料の開発

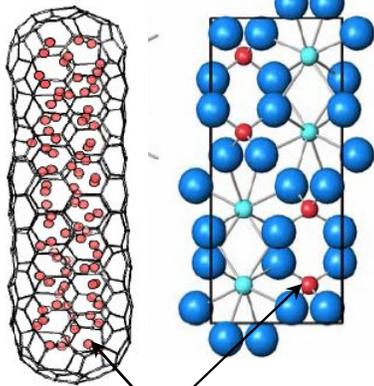
燃料電池構成材料の開発

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)

カーボン
ナノチューブ

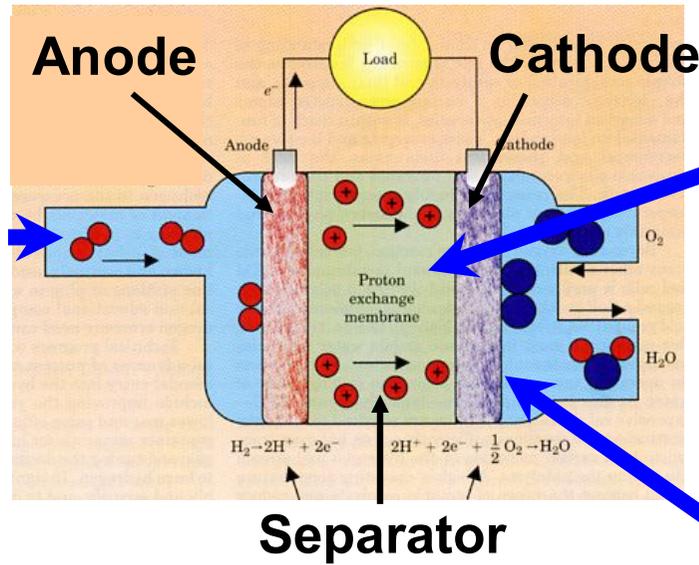
NaAlH₄
合金



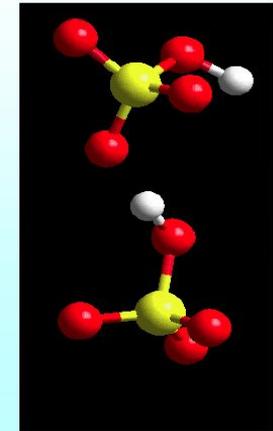
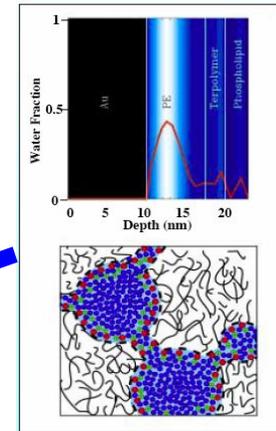
水素

水素吸蔵材料の開発
(チョッパー型非弾性散乱装置)

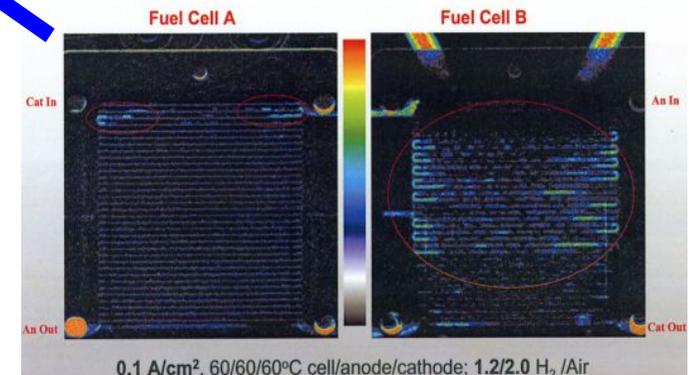
水素



水素燃料電池の構造



高分子膜透過機構
解明と材料開発
(反射率計・高分解能構造
解析装置・ナノ構造解析装置)



生成水のその場観察
(中性子ラジオグラフィ)

貴金属やレアアースメタルの使用を
極力抑えた電池材料の開発

シリコンドーピング

シリコン半導体の製造

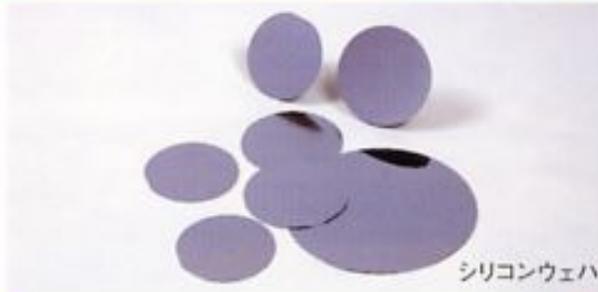
原子炉内で単結晶シリコンを照射して、原子核反応 $[^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P}]$ によってシリコン中にリンを均一に添加することによって半導体とし、パワートランジスタ、高電圧・大電流を制御するサイリスタ、ビデオカメラの撮影部に使われているCCDなどに利用します。

原子炉内で照射

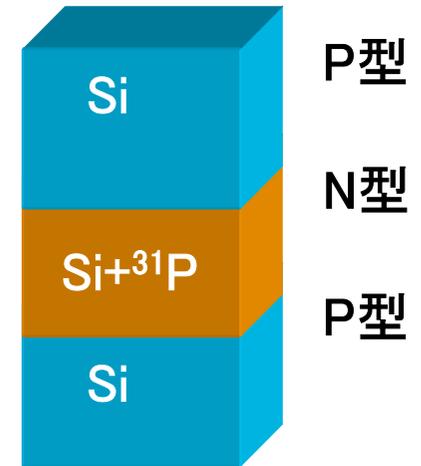
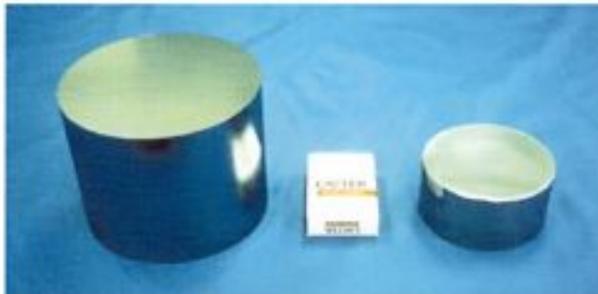


JRR-3Mシリコン照射装置

シリコンスライス・半導体加工



単結晶シリコンインゴット



中性子利用による
半導体デバイス製作

世界生産量150t/年のうち、日本は100t生産
JRR-3での処理量は5%に過ぎない

産業界の期待

産業利用に繋がる測定技術の開発とTT

高機能・新機能製品に繋がる材料の早期創製

大容量・小型Liイオン電池構造の開発

燃料電池電極・セパレータ材の開発

10年先の実用化を目指した先端的技術開発
の推進

産業界からの要望

使いやすい運用システム

定期受付＋常時受け
安い利用料金
施設側の十分な支援

守秘義務の完全履行

モノ、情報、技術者の時間的/空間的分離
施設側担当者の倫理教育の徹底
測定代行業者の育成

産学官連携の推進

協議会研究会活動における学官の協力・支援
「死の谷」の消滅