

量子ビーム利用推進小委員会 2019.12.24

資料1-1
科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
量子科学技術委員会
量子ビーム利用推進小委員会
(第33回)
令和元年12月24日

大型から小型までの日本の 中性子施設利用

鬼柳善明

名古屋大学工学研究科 特任教授

北海道大学 名誉教授

西安交通大学 名誉教授

内 容

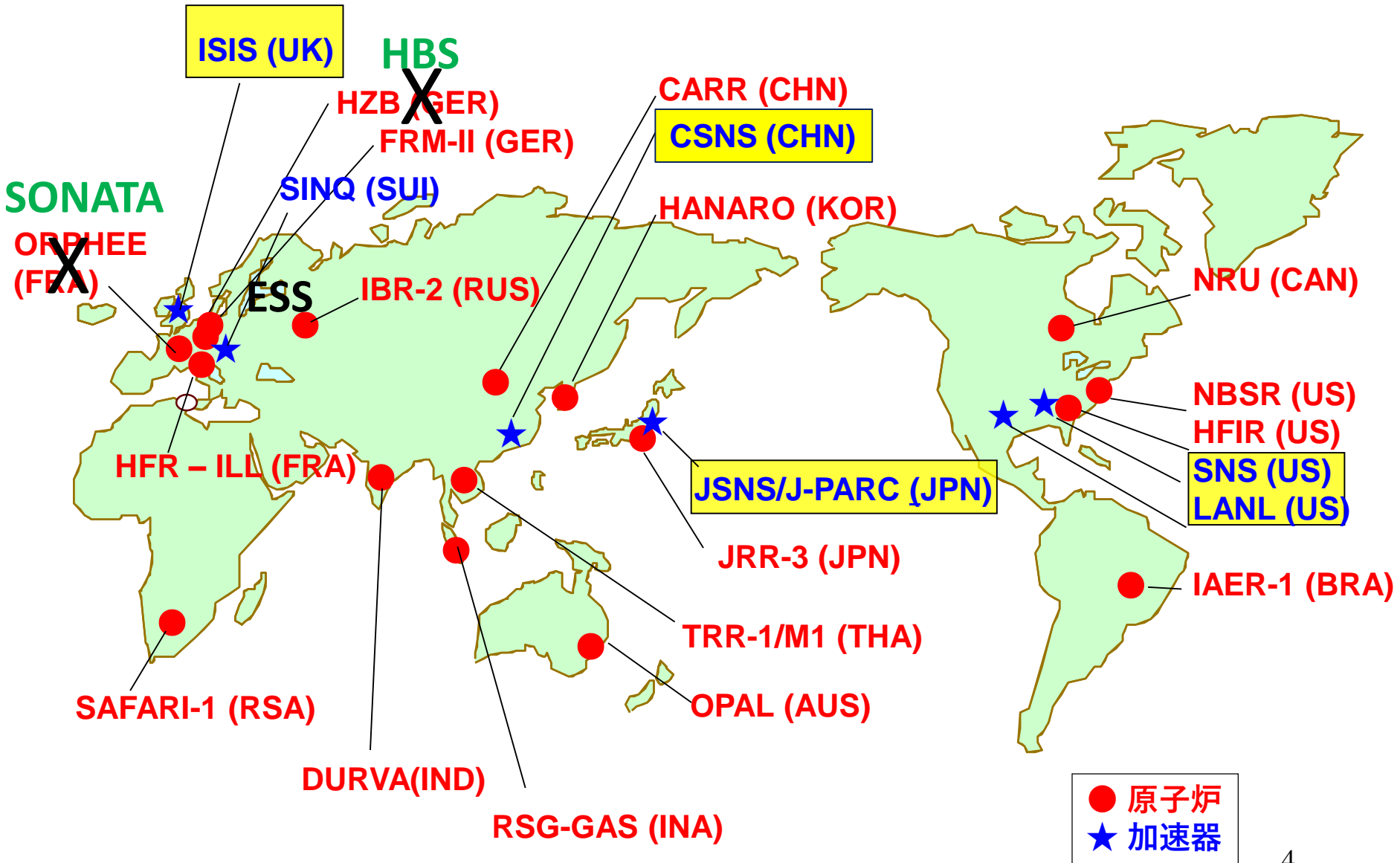
大型から小型までの中性子源の現状とその利用例と施設連携

1. 中性子源の現状
2. 中性子による最近の研究
3. 大型から小型までの相補利用
4. 中性子施設の連携に向けて
5. まとめ

1. 中性子源の現状

- 世界の中性子源はまだ原子炉が主流。
- 稼働年数が長くなっているなどの理由でシャットダウンされていくものが増加。
- 小型・中型加速器の建設及び計画の増加。

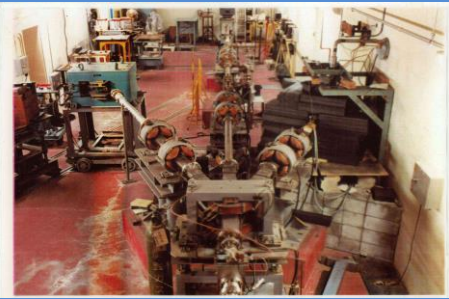
世界の主な中性子源



ORPHEE、HZBは2019年中に稼働停止

藤井先生資料を改訂

日本の中性子散乱用施設



HUNS(35MeV, 30 μ A)
 $10^3 \sim 10^4$ n/sec/cm² @7m
 Cold-fast neutrons

Aomori Prefecture Quantum Science Center QSC (20MeV, 50 μ A)
 6.1×10^5 n/sec/cm² Thermal

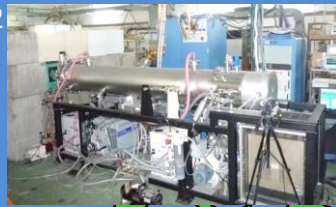
J-PARC (3GV, 333mA)
 RADEN:
 $\sim 10^8$ n/sec/cm²



RANS(7MeV, 100 μ A)
 $\sim \text{few} \times 10^4$ n/sec/cm² @5m
 Thermal neutron



KUANS (3.5MeV, 100 μ A)
 $\sim 5 \times 10^2$ n/sec/cm²
 @5m @ 0.35kW
 Thermal neutron



SHI-ATEX (18MeV, 20 μ A)
 $\sim 2 \times 10^5$ n/sec/cm²
 Thermal



KUR (Reactor): Thermal
 E2: $\sim 4 \times 10^5$ n/sec/cm² @5MW
 B4: $\sim 10^{6-7}$ n/sec/cm² @5MW

KURNS-LINAC (40MeV, 100mA)
 $\sim 10^3$ n/sec/cm²

JRR-3 (Reactor) 2021
TNRF: $\sim 10^8$ n/sec/cm² Thermal neutron
CNRF: $\sim 10^7$ n/sec/cm² Cold neutron

* 産総研で建設中

5 イメージングのラインの強度

中性子強度と可能な測定

中性子強度 (n/sec)



KUR

JRR-3

10^{11}

10^{12}

10^{13}

10^{14}

10^{15}

10^{16}

10^{17}

KUANS

HUNS
RANS
KURNS-L

BNCT

KENS
(closed)

J-PARC

イメージング
装置・機器
断面積
回折

イメージング
装置・機器開発
パルスイメージング
回折
中・小角散乱
反射率
準弾性散乱

イメージング
装置・機器開発
パルスイメージング
回折
中・小角散乱
反射率
準弾性
非弾性散乱

・イメージング
・装置・機器開発
・パルスイメージング
・回折
・中・小角散乱
・反射率
・準弾性
・非弾性散乱

ソフトウェア加速試験

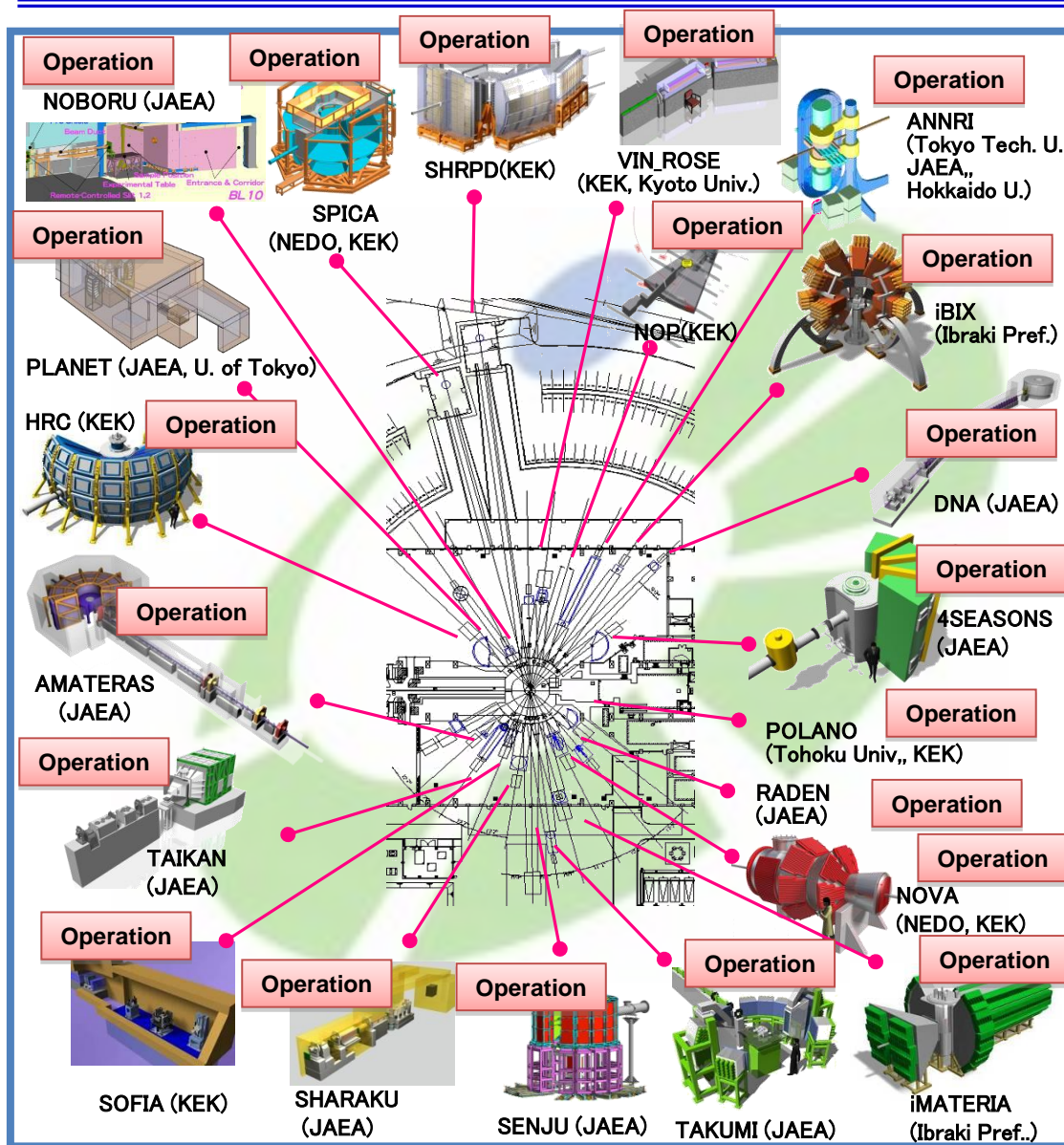


2. 中性子による最近の研究

- J-PARCでは色々な成果があがっている。
- 小型・中型でも研究が進んでいる。

ごく一部の断片的紹介

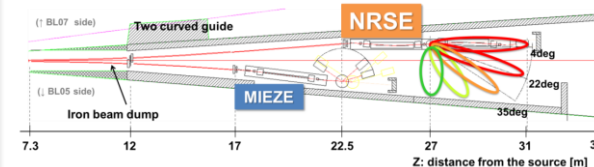
散乱装置の例: J-PARC/MLF



- 23 Neutron Beam Ports
- Operation: 21 (April, 2019)

VIN-ROSE (NSE): opened to users @2017B

Schematic top view of VIN_ROSE



POLANO
(Polarization
Analysis Spect.)



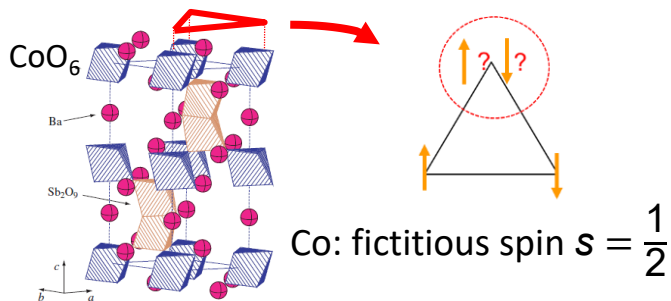
Opened to users @2019A

Courtesy of Prof. Kanaya

三角格子ハイゼンベルグ反強磁性体における量子効果@J-PARC

Nature Comm. 8, 235 (2017).

$\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$: 理想的な量子スピン ($S=1/2$) フラストレーション系である



研究動機

- 等辺三角形 → 理想的なフラストレーション系
- スピン $S=1/2$ → 強い量子効果が期待
- スピン励起状態について、よく知られていない

本研究:

高品質の結晶と高性能装置(AMATERAS, BL14)を用いて $Q-\omega$ 空間でスピンダイナミクスを詳細に調べた

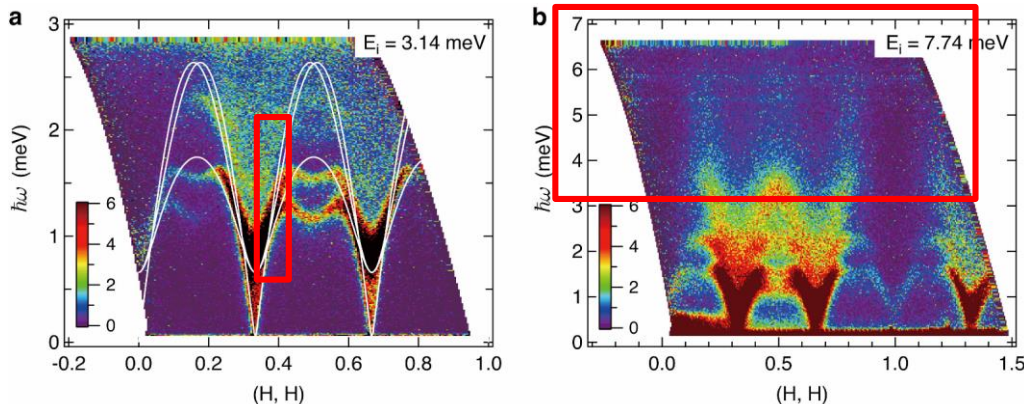
結果

- 高精度測定により励起の詳細を明らかにした
- 負の繰り込みと線幅の広がり理論の予想通りであった
- 3mV以上の領域で新たなエネルギー連続性が明らかになったが、これは既存の理論では説明できない



この結果により、三角格子ハイゼンベルグ反強磁性体の励起状態における理論に新たな興味を持たれ、理論家に改善を迫るものである

For example: Y. Kamiya, *et al.*, Nat. Commun. 9, 2666 (2018).



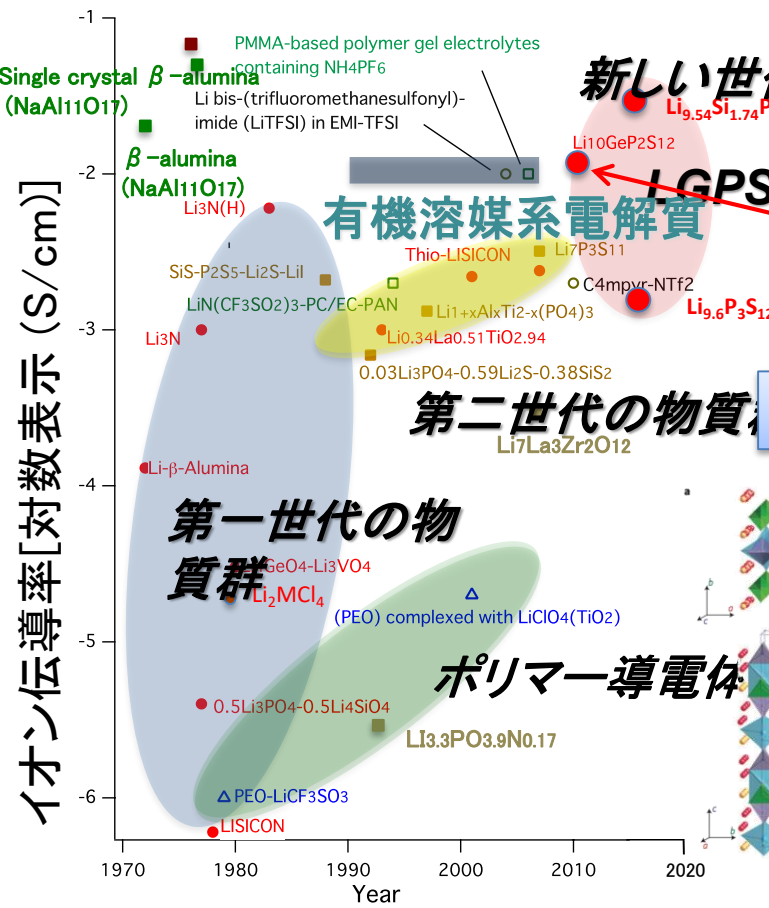
実線は線形スピン波理論計算によるベストフィット(左図)。既存理論で説明できない3 meV以上の励起(右図、赤枠)

超イオン伝導体を発見し全固体セラミックス電池を開発@J-PARC

Courtesy of Prof. Kanaya

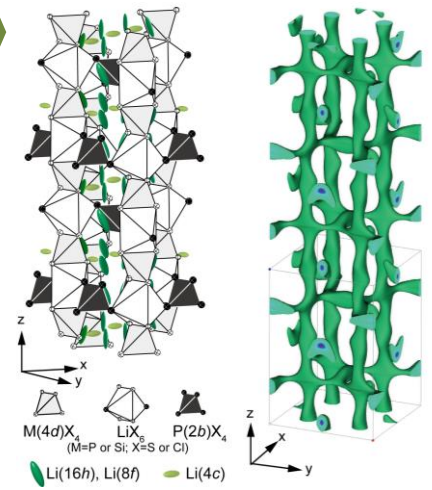
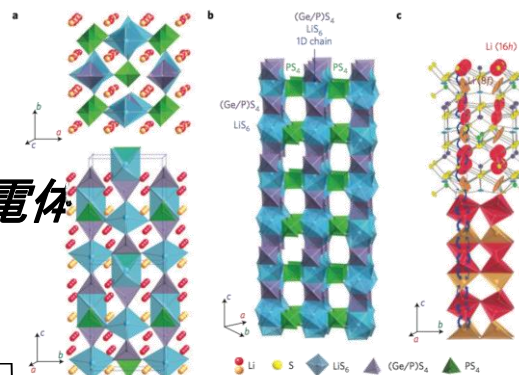
東工大、物構研、トヨタ自動車、茨城県

中性子回折によるLi拡散経路の解析が開発の鍵(3次元的な拡散経路の実現による高性能化)



1次元的な拡散経路

3次元的な拡散経路



Li₁₀GeP₂S₁₂
Nature Materials (2011)
4年で450citation

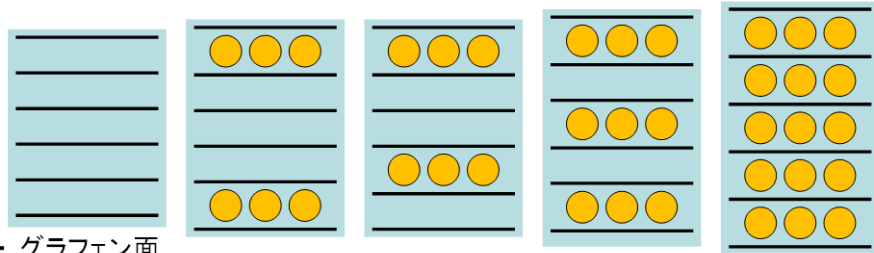
Li_{9.54}Si_{1.74}P_{1.44}S_{11.7}Cl_{0.3}
Nature Energy (2016)

7/25 東京新聞
7/28 中日新聞

「トヨタ、全固体電池搭載のEVを2022年国内発売へ」

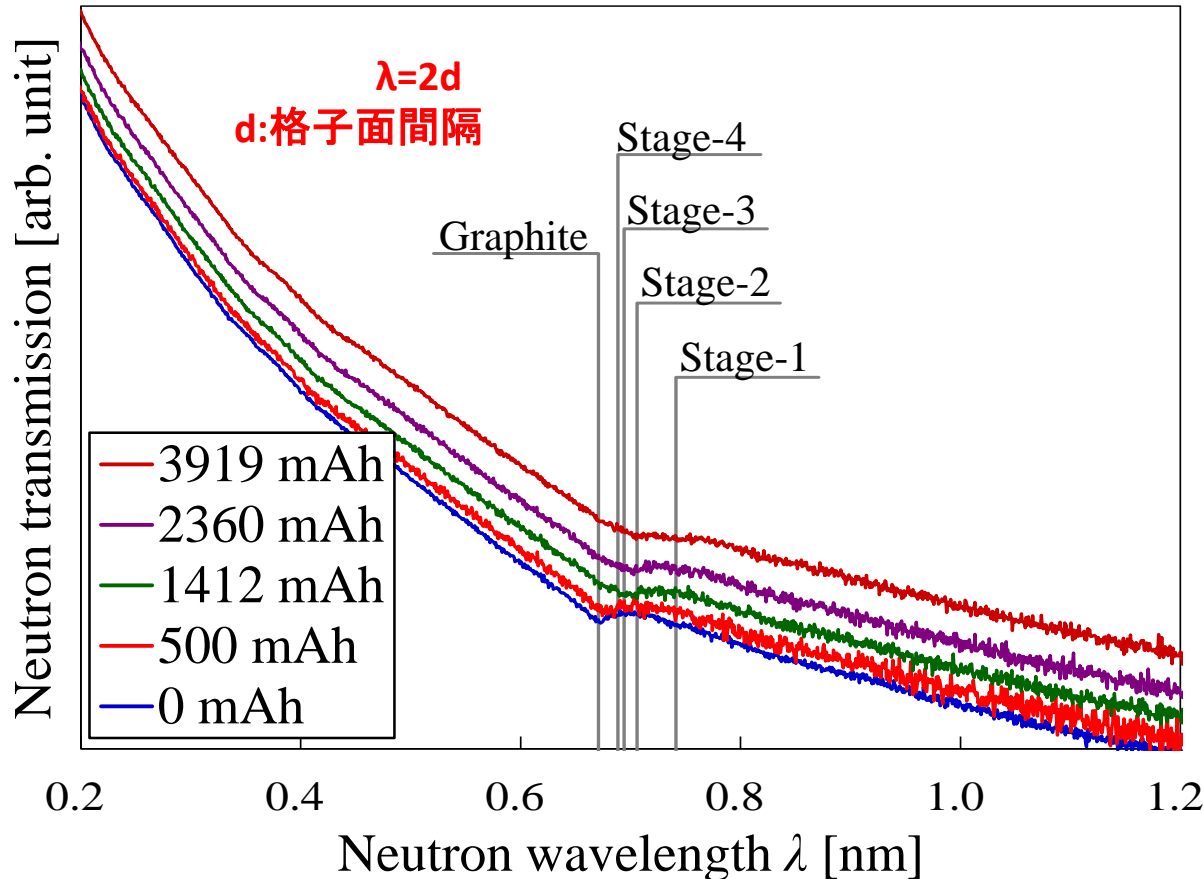
Li電池の充電量による黒鉛層間隔の変化@北大HUNS ①

Graphite 0.3354 nm⁻¹ Stage-4 0.3442 nm⁻¹ Stage-3 0.3471 nm⁻¹ Stage-2 (LiC₁₂) 0.3530 nm⁻¹ Stage-1 (LiC₆) 0.3706 nm⁻¹



— グラフェン面
● リチウムイオン

*1: {002}面の平均結晶格子面間隔 d_{002}



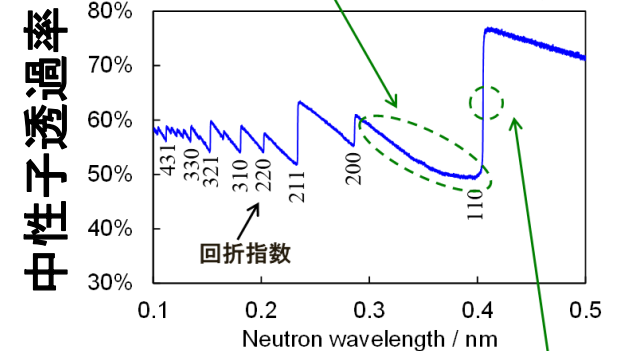
中性子エネルギー依存透過スペクトルのブラッグエッジ解析

形状変化 & 強度増加 (多重回折)

● 集合組織 (選択配向)

● 結晶子サイズ

α-Feのブラッグエッジ例 (厚さ5 mm)



エッジパターン (位置 & 高さ)

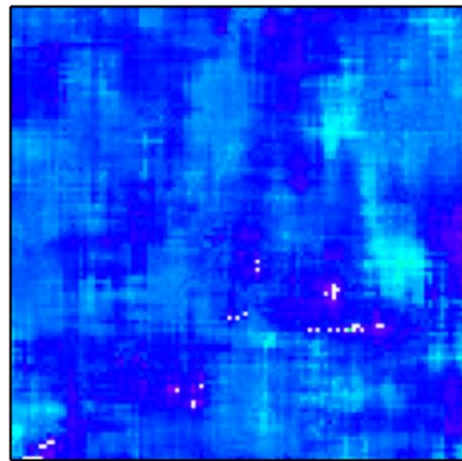
● 結晶構造

● 結晶相

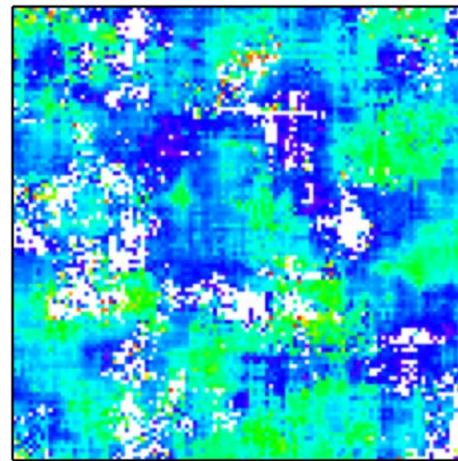
エッジ出現波長

● 結晶格子面間隔

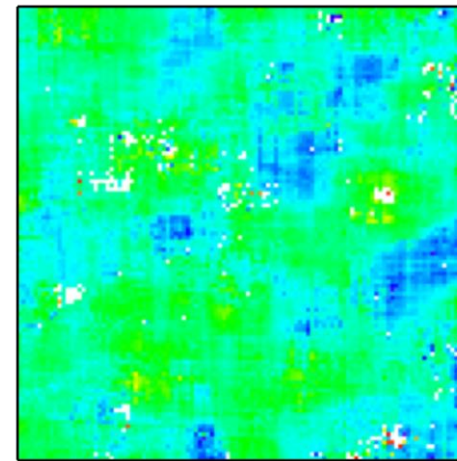
Li電池の充電量による黒鉛層間隔の変化@北大HUNS ②



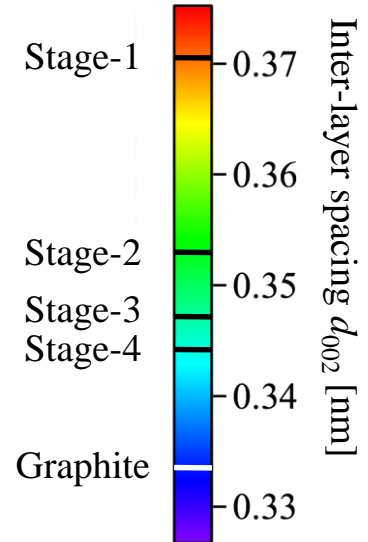
0 mAh



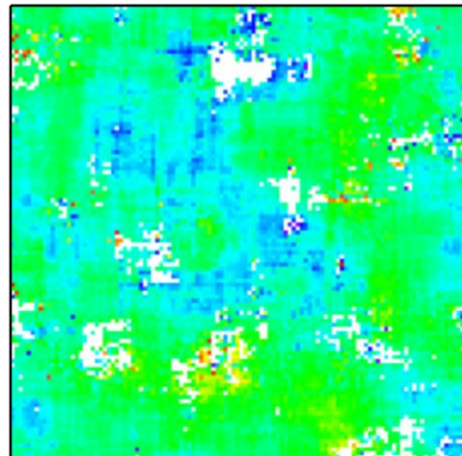
500 mAh



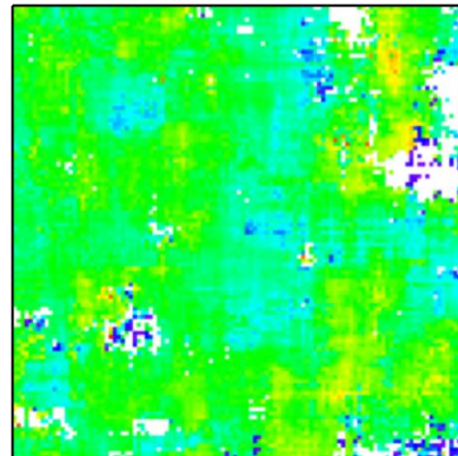
1412 mAh



2360 mAh



3919 mAh



Charged

黒鉛の層間隔がmmオーダーの大き
きさで不均一に分布している。

画像面積 ~ 9 cm × 9 cm

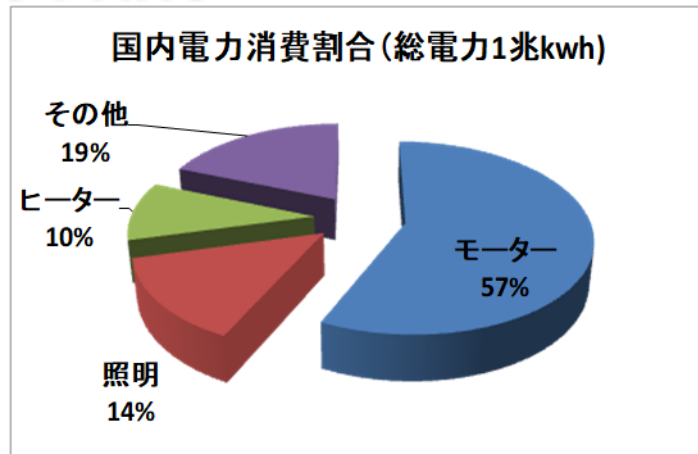
中性子を用いた磁場の可視化@J-PARC

モーター等の磁場関連機器の電力消費量は膨大

損失低減における課題

- 加工による材料性能の劣化
- 磁場設計と実際の磁場とのかい離

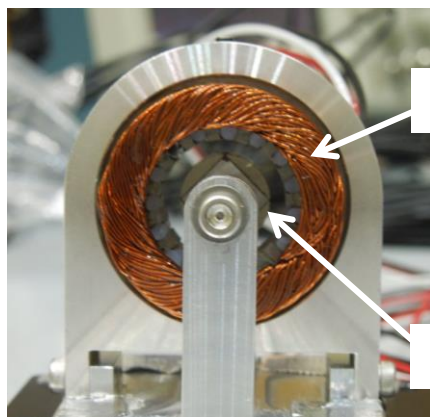
組立後の性能を把握して、設計に反映するためには
機器そのものの磁場を直接観察する技術が必要



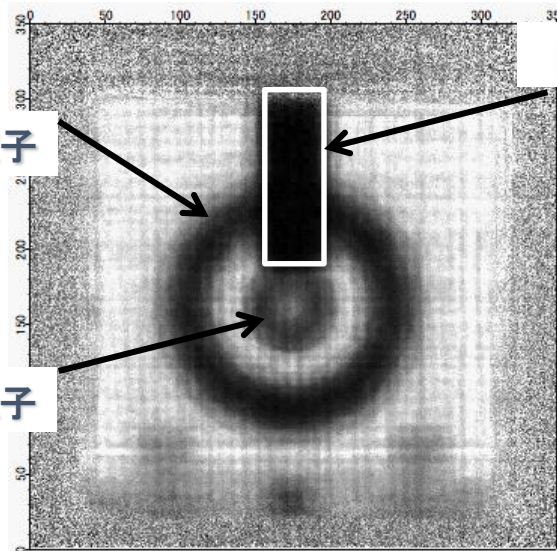
50%以上の電力をモーターが消費

中性子は小さな磁石。磁場中でラーモア歳差運動。偏極度の解析から磁場強度の測定。

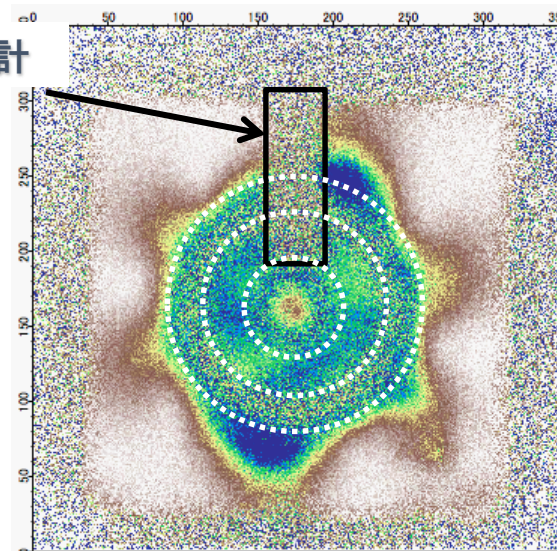
モデルモーターの磁場観察 稼働状態での磁場分布を観察 → 設計磁場との直接比較へ



モデルモーター
回転周期 21.5Hz



中性子透過強度像

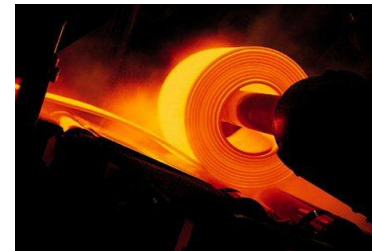
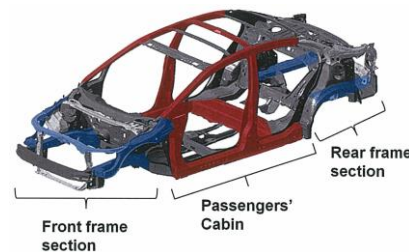
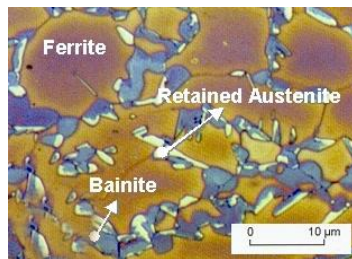


中性子偏極度画像

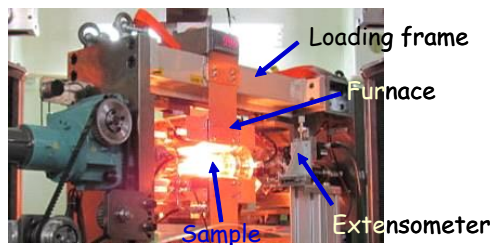
高性能鋼の開発 (TRIP, TWIP...) @J-PARC

張力と延性 - ミクロ構造の制御

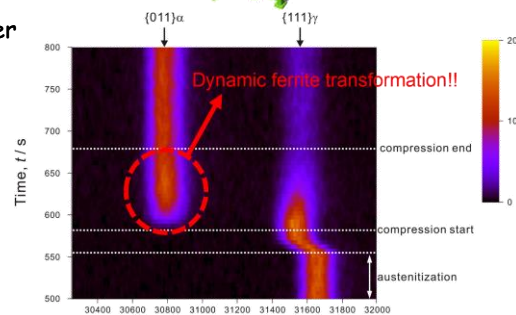
処理過程における結晶グレインの構造制御が高性能を得るキー



加工熱処理シミュレーター(Thermec-Master) がTAKUMI (BL19)に設置された。
(The Elements Strategy Initiative)



- High-frequency induction heating & servo motor driving
- Gas (N_2 , He) injection cooling
- Highest temp: 1200 C
- Heating/cooling rate $\leq 30C/s$
- Deformation rate $\leq 100 \text{ mm/s}$, 30 kN (compression)



フェライトへの相変化が熱間圧縮で加速 -> 動的変態

Yoshihiko Nakamura *et al.*, submitted to Special Issue by The Mineral, Metals & Materials Soc.

Courtesy of Prof. Kanaya

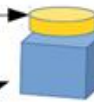
複相鋼中のオーステナイト相分率評価@RANS (加工性と靱性：高い企業ニーズ)

Quantitative measurement for austenite of dual-phase steel



SUS316 25%CR (FCC, Austenite, $\phi 10\text{mm}, w1\text{mm}$)

Annealed SM440A (BCC, Ferrite, 10mm^3)



RANS 回折実験より

実際の体積比

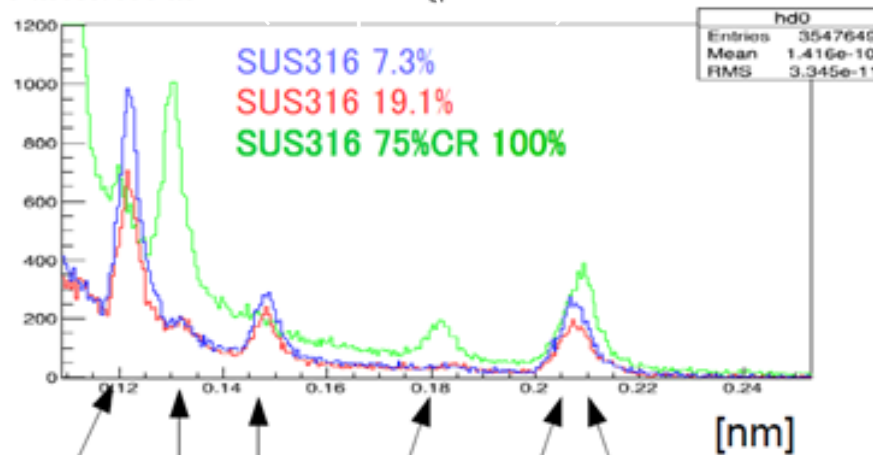
$6.7 \pm 0.8\%$

8.3%

$17.4 \pm 0.8\%$

19.1%

Counts/hour

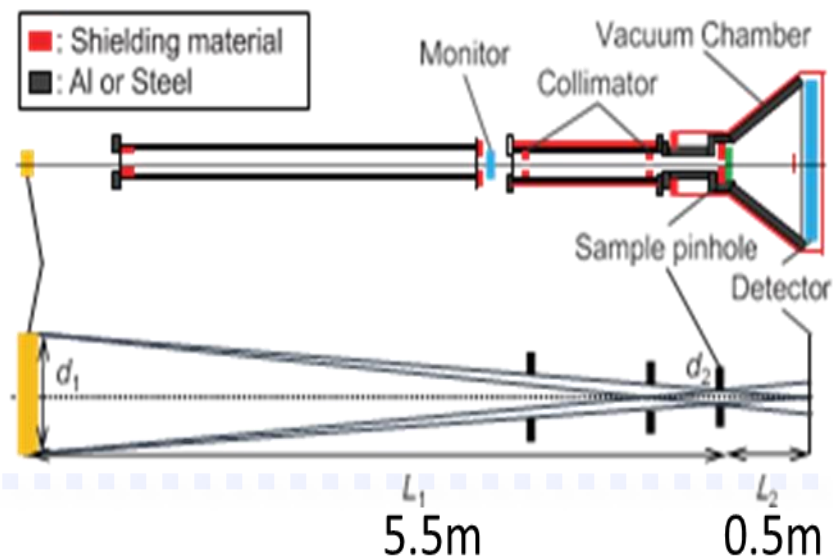
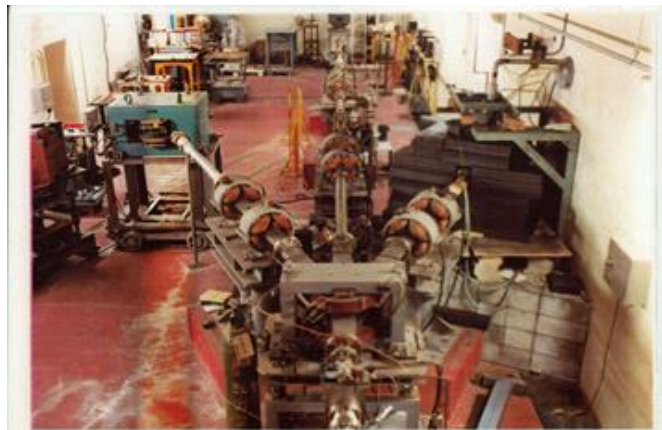


Peaks of both textures are measured

オーステナイト量 相分率
約1%精度で一致
→小型で残留オーステナイト
評価可能：材料開発加速

*Rietveld analyzed with Z-Rietveld
R. Oishi et al, Rietveld analysis software for J-PARC
Nucl. Instrum. Methods, A 600 (2009) 94–96

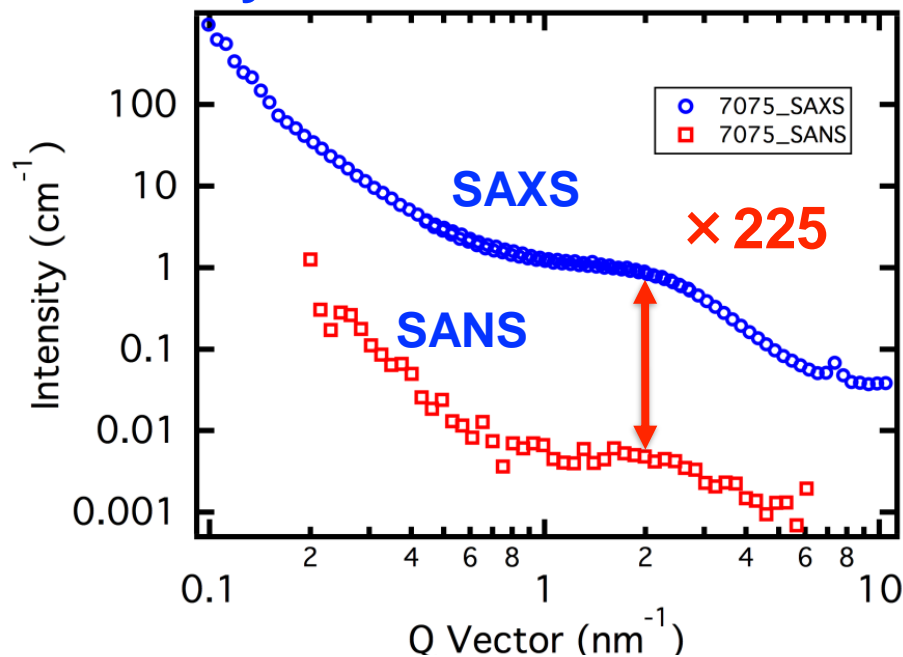
実験室 エックス線小角散乱 (SAXS) と中性子小角散乱 (SANS) の相補的利用@HUNS



iANS, 中角散乱装置による析出物解析

SAXとSANSの散乱強度スペクトルの形は同じ。
絶対強度は元素の散乱能で変わる。

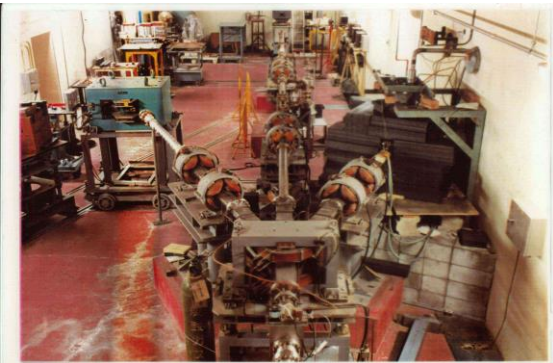
Al alloys: 7000 series



析出物 TiCMgZn_2 : 230

3. 大型から小型までの相補利用

JSNS/J-PARC開発時期と運転初期: 北大HUNSのみ



北大電子加速器
中性子源
HUNS(Pulse) 1 kW

- * 結合型液体水素冷中性子源:
J-PARC中性子源高性能化
- * ブラッグエッジ透過イメージング法:
日本発祥の新手法
- * 磁場イメージング法:
磁場強度定量評価



J-PARC(東海村)
1 MW



最近: RANS, HUNS, KUANS, KURNS-LINAC など
但し、殆どが事情が分かっている人

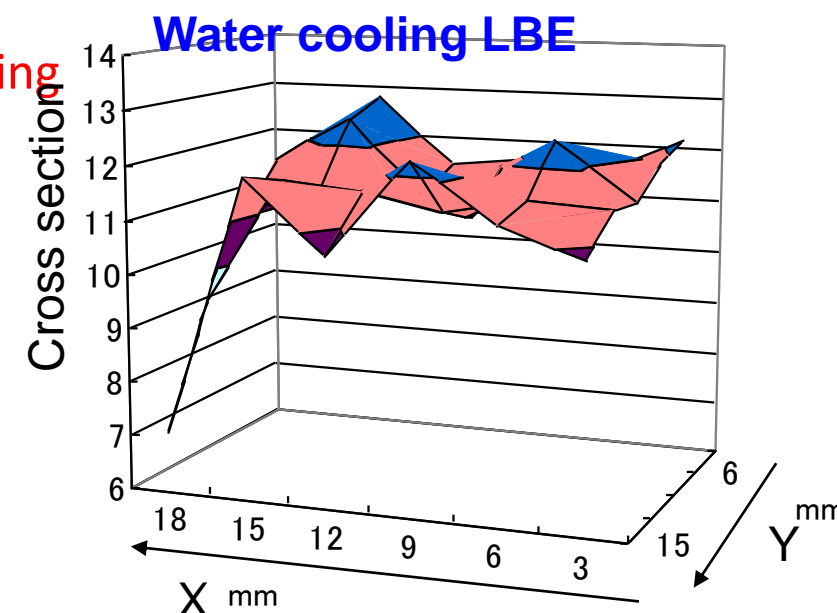
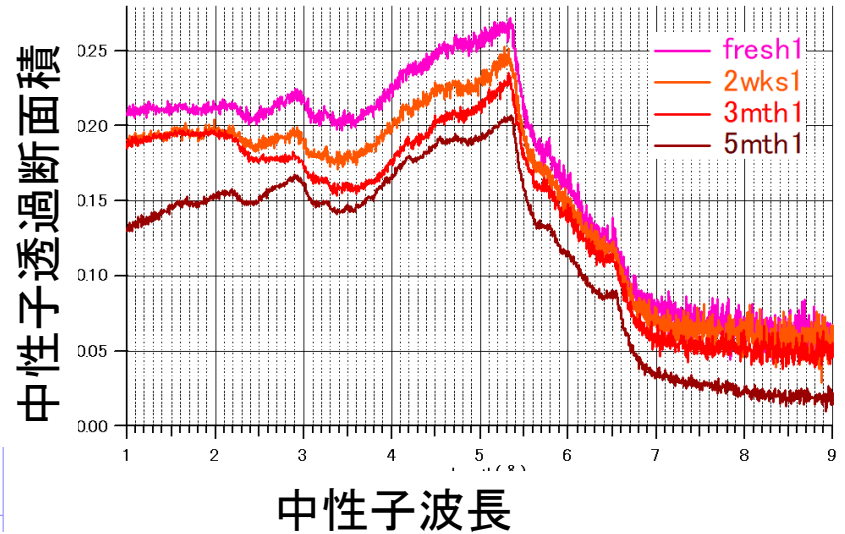
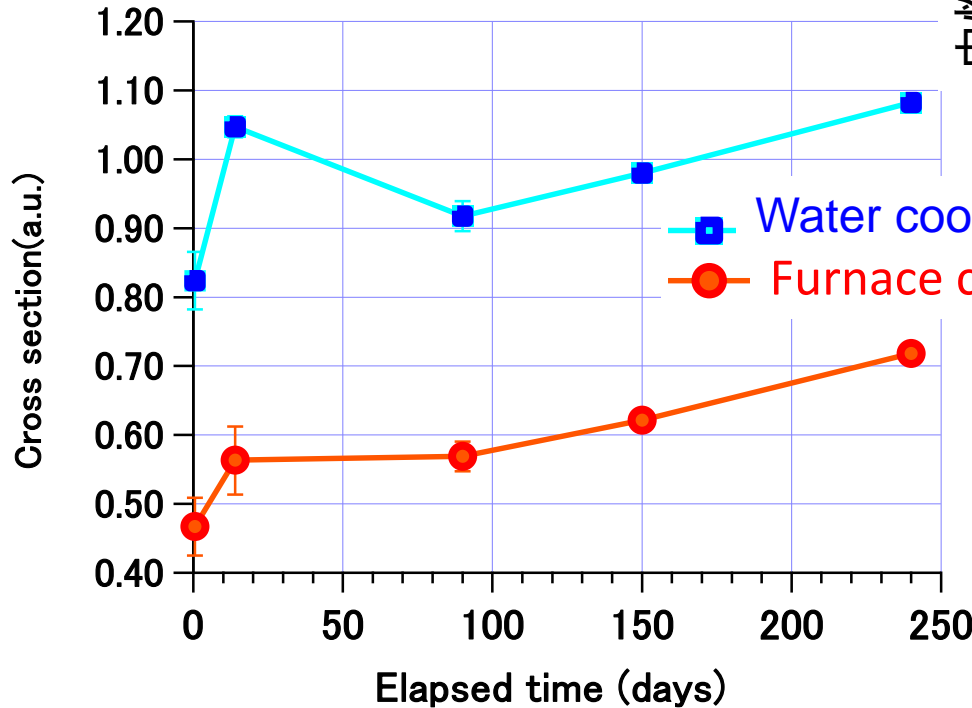
鉛ビスマスの凝固時の膨張@HUNS & J-PARC

O. Takada, et al., J. Nucl. Mat., A398, 129–131, (2010)

凝固時に膨張：配管の損傷

$\gamma(012)$ 相の生成の冷却速度による違い
→ブラッグエッジ解析

水冷すると全体に γ 相が多くできる。
→膨張が大きい



北大で同じサンプルを繰り返し測定：小型向き

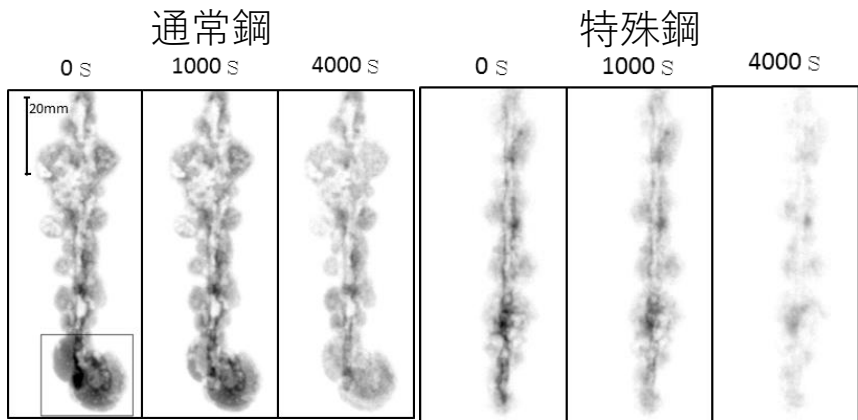
J-PARCで高位置分解能で測定：大型向き

腐食した鋼板の塗膜下の水の動態イメージング (NOBORU, BL10 & RANS)

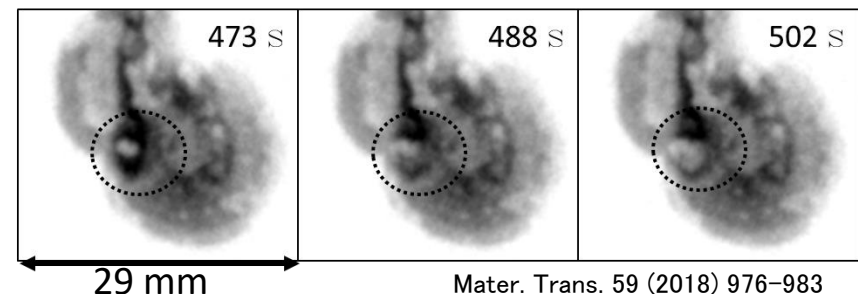
研究目的: 腐食した鋼板の塗膜下で水がどのように乾燥していくのかを実測し, 非破壊で腐食の進行と水の動態の相関を明らかにする.

研究成果: **小型中性子源RANS**により原理実証が進められた腐食した鋼板の塗膜下における水の分布の定量化手法を進め, 大強度中性子を用いることで高分解能撮像及び短時間測定を可能とすることで, 水の動的な分布変化の実測に成功した. 場所毎の水分量の経時変化のS/Nが上がる事で, 単位体積当たりの保水速度が通常鋼と特殊鋼で明らかに異なる事が示され, 特殊鋼の腐食耐性の高さが保水性の低さに関連している事を示す事が出来た. 本研究はまた, 小型中性子源と大強度中性子源の相補利用の有用性が確かな物である事を示す一例である.

水の分布の経時変化@RANS



短時間での水の動態可視化@J-PARC



A.Taketani et.al: Mater. Trans. 59(2018)

<https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018017>

学術会議大型マスタープラン提案 中性子施設ネットワーク



日本中性子科学会

1. 中性子科学会ロードマップ検討特別委員会提言(2018年)
施設連携が必要であることが提言の一つとして挙げられた
2. 中性子科学会基礎基盤部会報告書(2018年)
ネットワークと階層構造の具体的内容が部会内で検討された
★大型マスタープランへの提案



日本加速器学会

加速器中性子源用の加速器
開発に関して覚書締結



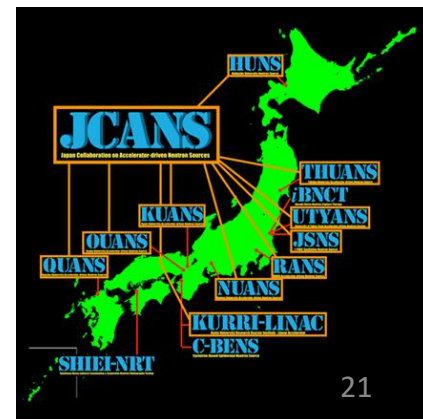
日本原子力学会

研究用原子炉の利用
促進に対して合意



各中性子施設との合意形成

JCANS(加速器駆動中性子源協議会)を
介して各中性子施設との合意

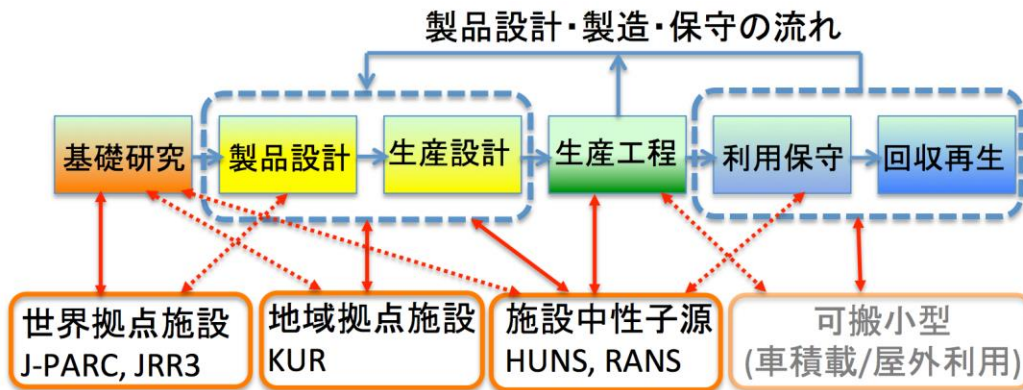


期待される効果

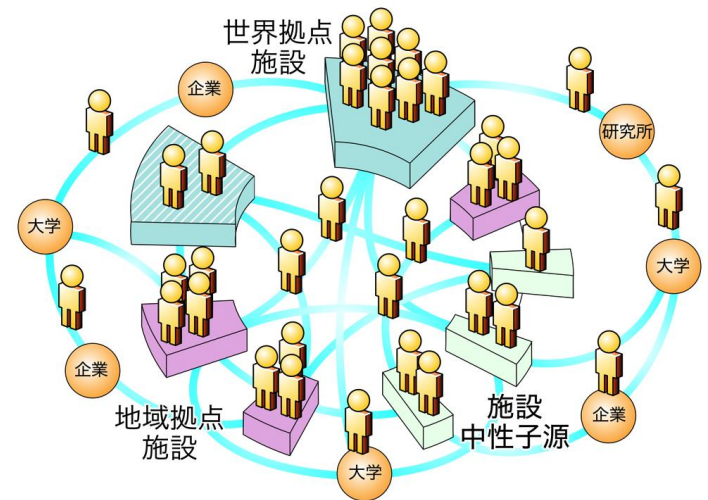
ネットワーク化による学術研究の進展によって研究上の成果増大に貢献できる。さらに様々な規模の中性子源で製品開発及び生産の各段階を網羅できるような利用体制を構築することで、産業界にも大きく貢献できる。

世界拠点施設	大型加速器	研究用原子炉	(最高精度測定→研究)	放射光施設
地域拠点施設	小型加速器+目的指向型設計		(実用的性能→産業利用)	高性能ラボX線装置
施設中性子源	小型加速器	RI線源	(インハウス計測・即応)	ラボX線装置

中性子施設規模の階層構造

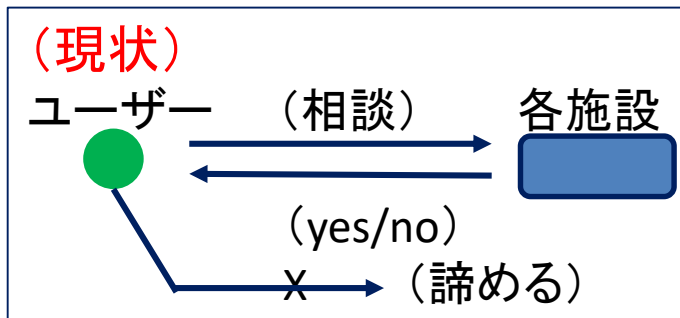


生産の各段階で異なる規模の中性子施設が必要

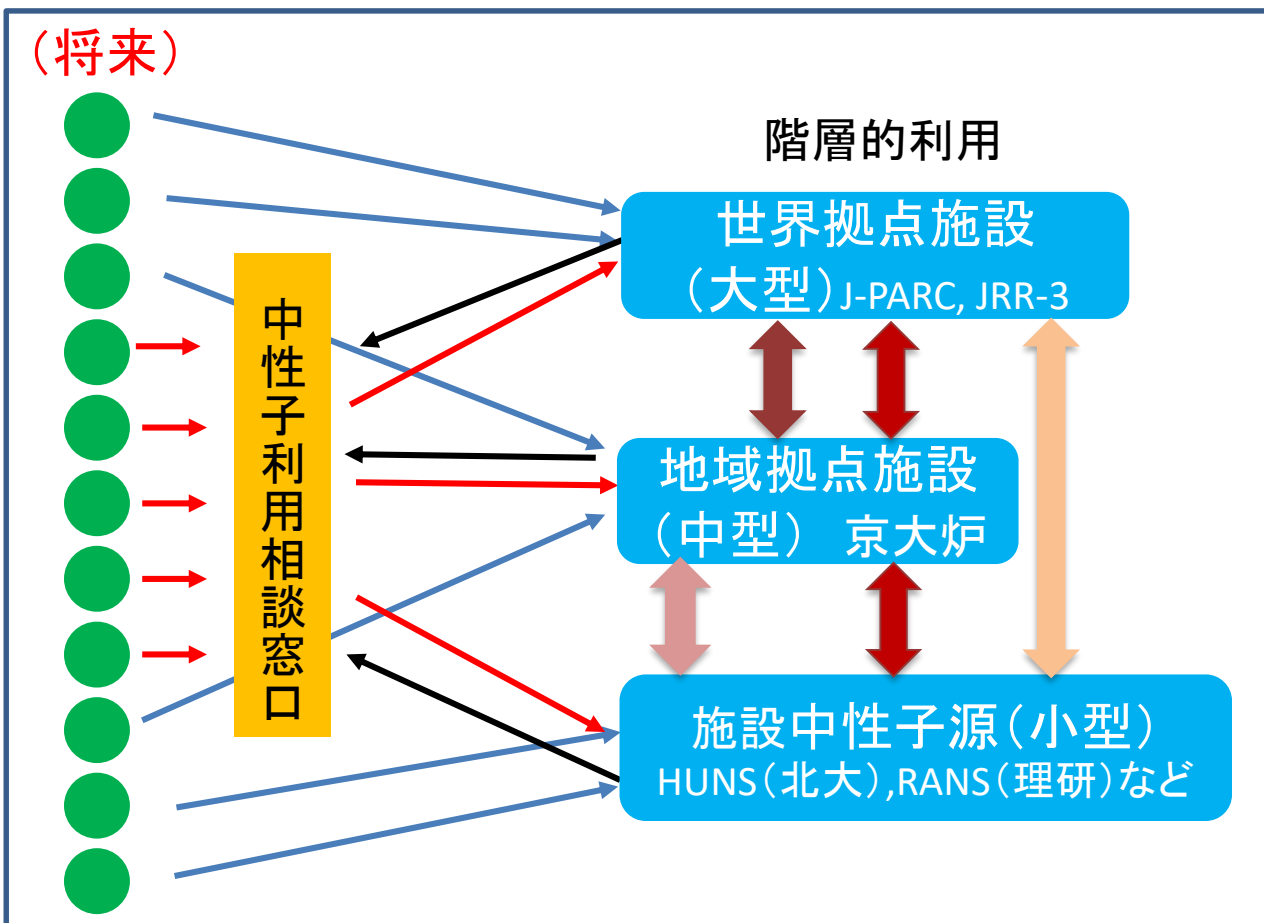


必要な人材を適材適所に配置することで効率的な運用と人材の流動性を確保²²

ユーザーがアクセスしやすいシステムの構築や施設の階層的利用の促進



- ・共通の、コンタクトしやすい相談窓口を設置する。
- ・最適な施設を紹介する。
- ・各施設に相談された案件で、自施設以外が良いと思われる場合に、共通窓口へ依頼する。



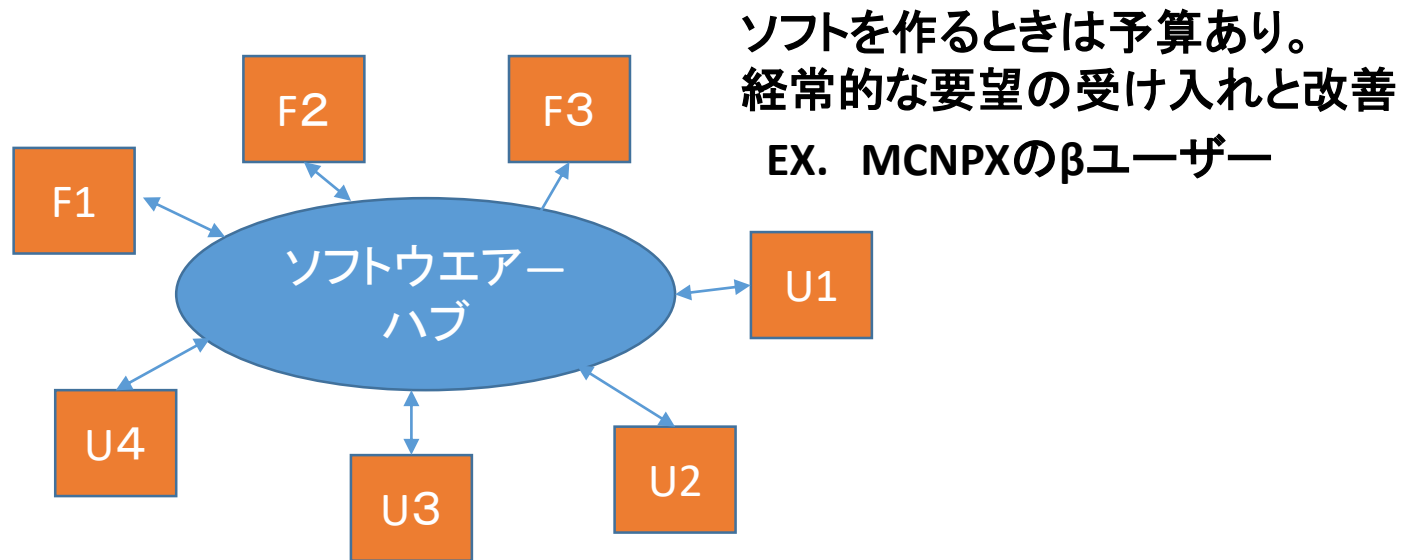
・JCANSの相談窓口
(当面)

・開発の必要度に応じて中性子施設を階層的に使えるようにする。

・地域拠点施設が不足している。

人とももの交流

- 中性子検出器などのデバイスの相互利用の推進
- ソフトウェアの共通化の推進
(ユーザーフレンドリーなもの。研究者だけが使えるものは別仕様)
- 人の交流で施設間ノウハウの普及
(例えば、冷中性子源の設置などで重複した開発を避ける)



- 装置開発もソフト開発も成果公開後、その成果を普及し一般化する。
→ 中性子施設全体のレベルアップ

連携に向けての活動

1. 中性子科学会に「中性子施設連携ワーキンググループ」を設置
2. 具体的連携に向けて、施設関係者、必要に応じてユーザーを含めた議論を進める。
3. できるところから連携を実施する。

中性子施設ネットワークの最終形に向けてのトライアル

具体的実施予定項目

- 1) 人材育成・中性子科学の普及
中性子スクールを小型・中型施設を中心にテーマを決めて実施
(既に、中性子・ミュオンスクールが東海であるので、その他の地域と担当者)
- 2) イメージング装置を例にした施設連携の検討
 - * データ書式の標準化
 - * ソフトウェアの標準化
 - * 付帯設備等の共通化
 - * 人材交流(知識の交流と人員不足の緩和)
 - * 人材育成
など
- 3) 中性子装置の統一的性能表記
その他

5. まとめ

1. **中性子利用は**、J-PARCが安定に稼働し、小型中性子源も含め利用が進んできた。しかし、まだ、その認知度は低い。
2. **小型施設中性子源利用**希望が増え、オンデマンド的な利用が小型でも難しくなっている。中性子施設(地域拠点中性子源など)がないと産業界の希望に沿えない状況である。
3. **階層的施設利用**による中性子資源の有効利用によって学術・産業利用を進め、効率良い成果創成が望まれる。
4. **共通化・標準化**などによる高効率化が、人員増が難しい現在は特に重要と思われる。中性子施設連携がそれに寄与すると考えられる。