

中性子科学の将来構想

散乱実験・透過実験の μm ギャップを埋める

新たな可視化・分析技術への挑戦

2025年6月30日

J-PARCセンター

中性子科学の将来構想（案）

2025 2026 2027 2028 2029 2030 2031 2032 2033 2034 2035

MLF

物質・生命科学
実験施設

Neutron Experiments for Materials and Life Science

TS1 upgrade (“MLF-double”)

TS2 design / construction

J-PARC TS2

TS2

TS1

3GeV
RCS

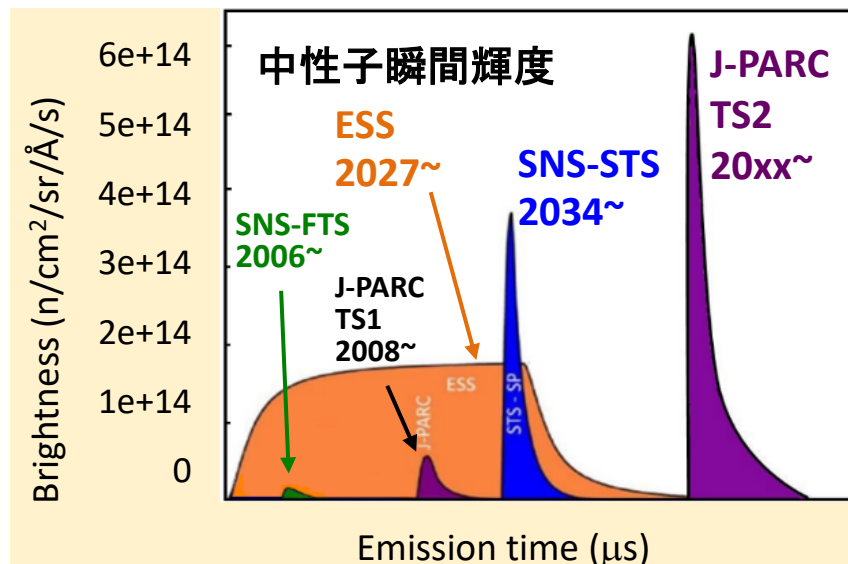
- 現行の水銀ターゲットステーションの高度化プログラム（MLF-double）を通じて、第2ターゲットステーションTS2の要素技術を開発
- 例えばTS2において目玉になる中性子顕微鏡の技術のフィージビリティスタディをTS1で行う

MLFの実験装置は国際的評価が高い

NAC* continues to note that MLF has world-class neutron instruments and instrumentation in many areas.

*NAC2025: Neutron Advisory Committee 国際諮問委員会

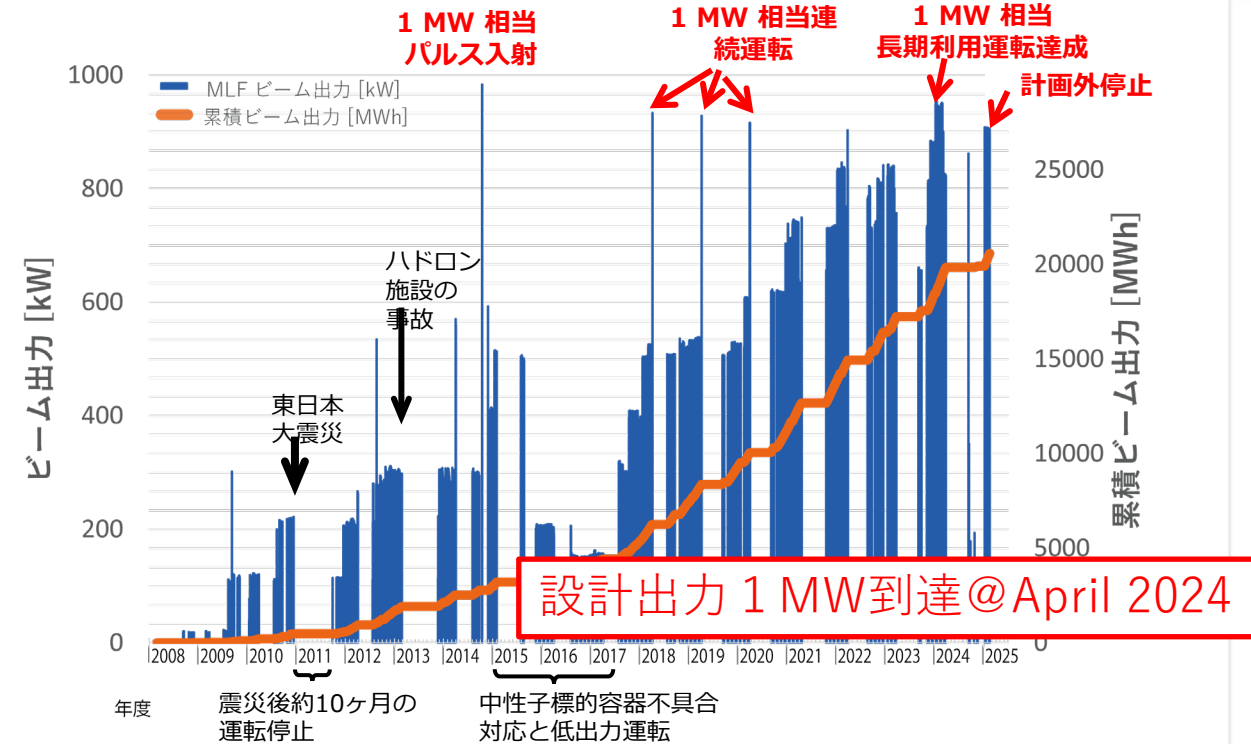
- 中性子源とミュオン源を一体化（世界初）
- J-PARC陽子加速器強度を1MWから1.5 MWに増強



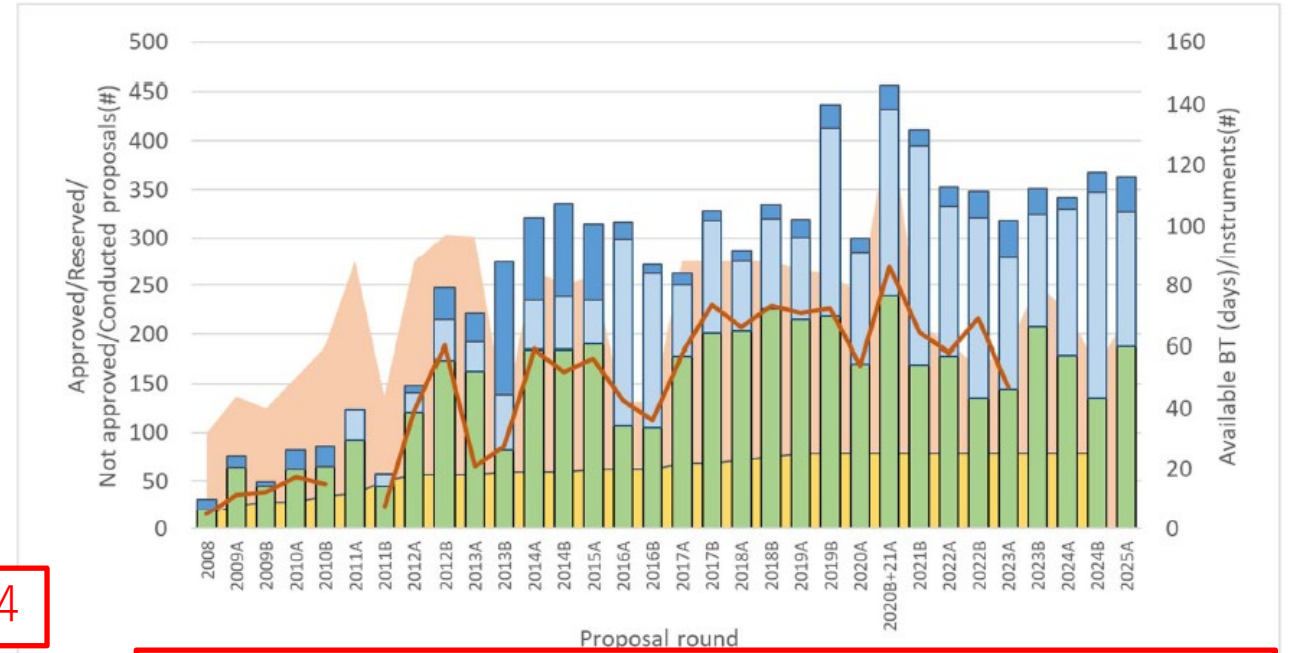
J-PARC MLF TS2は海外施設の次期計画を凌駕 2



MLFの現状とさらなる成果最大化への道



新利用者支援課題、P型課題を含む



一般課題競争率 1.7～2 倍
運転日数 8 サイクル (176日) → 7.2 (159日)

海外課題が増え続けている（一般課題申請50%以上、採択課題35%以上）。

設計出力 1 MW に達し競争率が2倍近くになっている現状で、世界的に競争力を持った日本を実現していくには？

ピークを伸ばす必要 (Top10%) 裾野の拡大 (新規分野の開拓) が必要

MLF double

これには測定効率を上げるしかない

新たなサイエンスの開拓

既存装置の実験効率化2倍

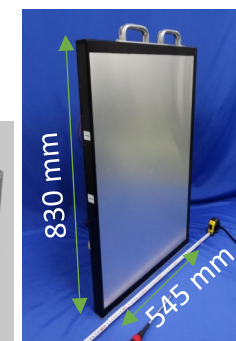
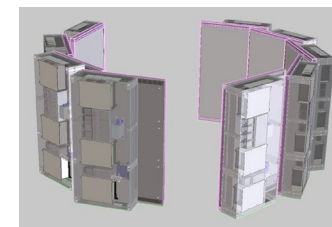
ー 大型検出器開発とBL18への導入 ー

○高度化装置による測定領域のイメージ

(現装置)



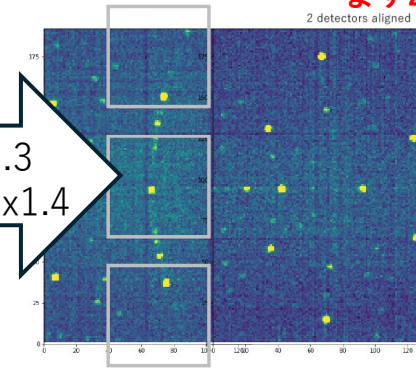
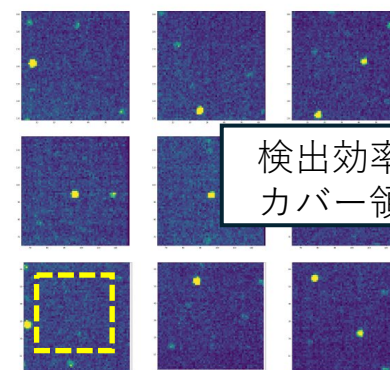
(高度化後)



中性子回折データ

大面積検出器9台+扇子状配置

まず2台導入



検出効率 x1.3
カバー領域 x1.4

208 x 208 mm

解析利用できるエリア

120 x 1232 mm

成果最大化の取組み：BLの新設

- BL13:** 新たな装置の設置により、見える領域を拡大し新しいサイエンスを生み出す
- BL07:** 中性子照射、ホログラフィー、新たな中性子利用方法を開拓し、若手人材育成教育にも寄与

サイエンス

- ・ 極限環境下の振動励起・磁気励起・スピン揺動
- ・ 極限環境下・オペランド環境下における軽元素の状態解明
- ・ 高分子やタンパク質の構造とダイナミクス
- ・ 中性子顕微鏡、ミュオン顕微鏡による実空間観察
- ・ 中性子・ミュオン基礎物理

BL改造・新規BL

- ・ BL07, 13 建設
- ・ Scrap & Build

推進コアの構築

- 偏極中性子利用
- 高エネルギー中性子偏極解析環境
- 情報科学導入、リモートアクセス
- ・ 試料作製・SE機器
- 重水素化ラボ、多重極限環境

MLF-double

- ・ 実験室建屋
- 側室増設、仮置スペース
- 空調能力向上
- ・ 長寿命ターゲット
- 予測精度向上
- メンテ作業期間の短縮

強靱なインフラ整備

- ・ モデレータ最適化
- ・ ガイド管最適化・追加
- ・ 検出器増設
- ・ 検出器高分解能化

大強度化・高分解能化

- ・ TMRA最適化計算
- ・ ベッセル枝管内ガイド管設置
- ・ ミュオンソレノイド

TS2を見越したR&D

例：検出器開発

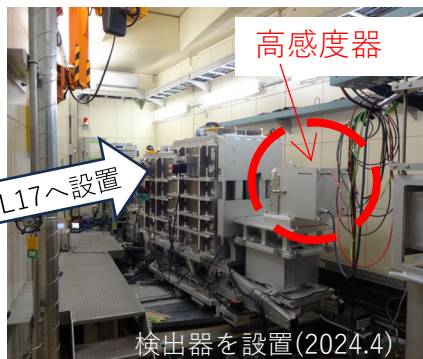
ー 2次元³Heガス型MWPC検出器の開発 ー BL17

- ・ 高耐圧・個別ライン読み出し型の**高感度検出器**を開発 (³Heガス圧 1.5 bar → 6 bar)
- ・ 高感度(>80%)、高位置分解能(<1 mm)、高計数率(>500kcps)を達成

高耐圧チャンバー

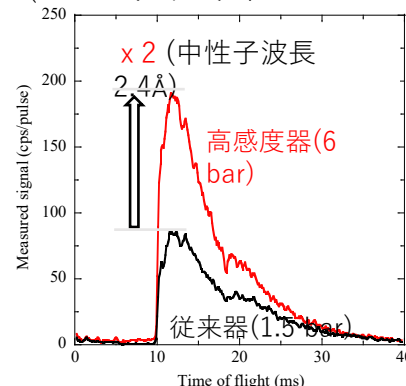


BL17へ設置



検出器を設置(2024.4)

(1x1mm ダイレクトビーム@BL17)



従来品と比較して~**2倍**の検出効率を実現 (80% @ 2 Å)

世界初のビームラインの整備によるさらなる成果の創出へ

BL13で期待される課題 = マイクロスケールの科学

BL13建設計画 — SE-SANS＋イメージング

世界初

BL13の新設により
「資源循環」「低炭素化」「再エネ活用」「水素利用」
の課題解決に繋がる評価技術の実現へ

μm スケールの領域には、これまでの技術では
観察・測定できない重要な現象が多数存在

- ❑ 燃料電池・水電解技術・蓄電池中の水・リチウムの挙動
(再生可能エネルギー・水素社会、資源循環)
- ❑ 製造プロセスのPI (process informatics) 解析
(低炭素化、資源循環)
- ❑ コンクリート・土壌中の水分挙動
(資源循環、低炭素化、環境保護、防災・減災)
- ❑ 材料科学(高強度金属材料、3Dプリンティング)・食品科学・農業分野への応用
(低炭素化、資源循環、環境保護)
- ❑ 惑星科学(小惑星リュウグウのサンプル中の水分分布の解析)

μm に多段階の不均質性の存在

豊富な情報
モデルの構築に寄与
(イメージング)

イメージング
の限界

プロフィール解析
(SANS)

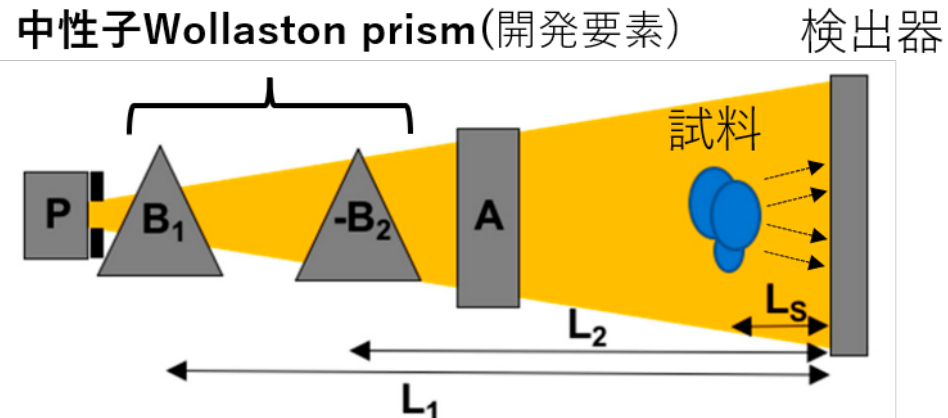
SE-SANSが
このギャップを埋める

ターゲットの多くは循環型社会の実現において重要な軽元素(水素やリチウム)が関連する現象

BL13において実現・開発する研究技術

SpinEcho-SANS

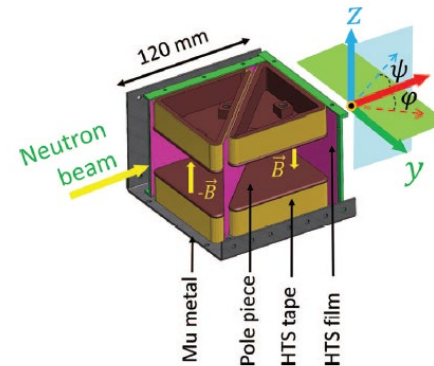
ビームを絞ることなく極小角の散乱情報を取得可能な
Spin-Echo SANS法 (SE-SANS)を利用。



- ✓ 小角散乱(SANS)とイメージングのどちらからも測定が困難だった100nm ~ 10 μ mスケールの構造情報を取得する。(= μ mギャップを埋める技術)

要素技術開発

- Wollaston Prism マグネット



SE-SANSの実現には特殊な超伝導マグネットの製作が必要不可欠。ISIS Larmorで利用されているマグネットはほぼ手作り。国内メーカーを中心にマグネット設計および試作を進める。

- 挿入光学系

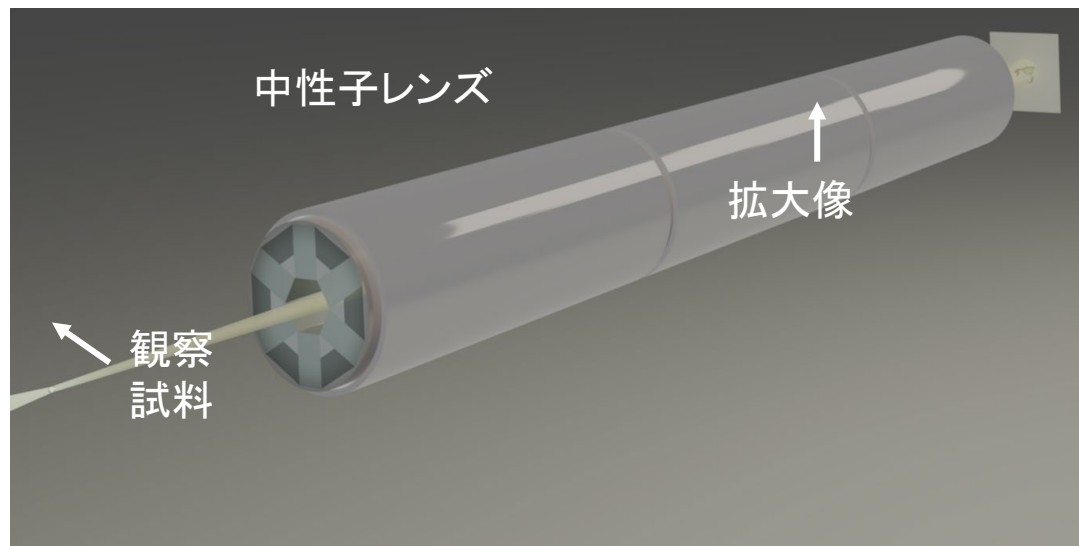


中性子ターゲット部にある減速材からシャッターを経てビームラインへと繋がる最上流部に、中性子強度を稼ぎながらビームの性質を最適に整えるための中性子光学デバイスを入れる。

- 小角散乱とイメージングの両立＝世界で初めてのアイディア・世界をリードする装置
- マイクロスケールの現象の可視化・解析を通じて、国内産業の本格的利用・アカデミアの先端研究を支える装置となる

BL13を活用した更なる将来構想：中性子顕微鏡

中性子顕微鏡



中性子レンズを用いてビームを結像し、
 $1\mu\text{m}$ の空間分解能を実現する

SE-SANS + イメージング

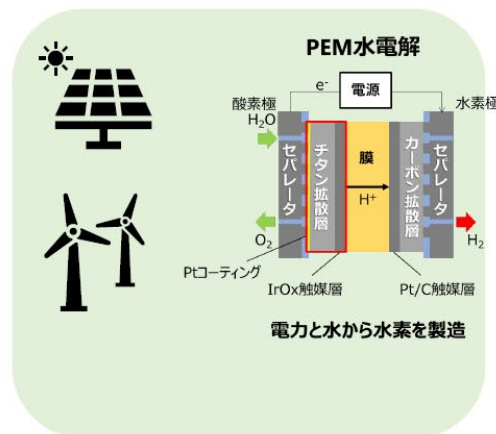
将来
TS2

- ✓ 中性子顕微鏡の開発により、SE-SANSと重複する測定領域を拡大し、解析能力を向上
- ✓ BL13においてフーズビリティスタディー ➡ TS2にフルインストール

水素社会実現への道（燃料電池・水電解）

水素を水から製造し、貯蔵し、燃料電池セルで消費して電気を取り出す。電気はLi蓄電池で蓄える。

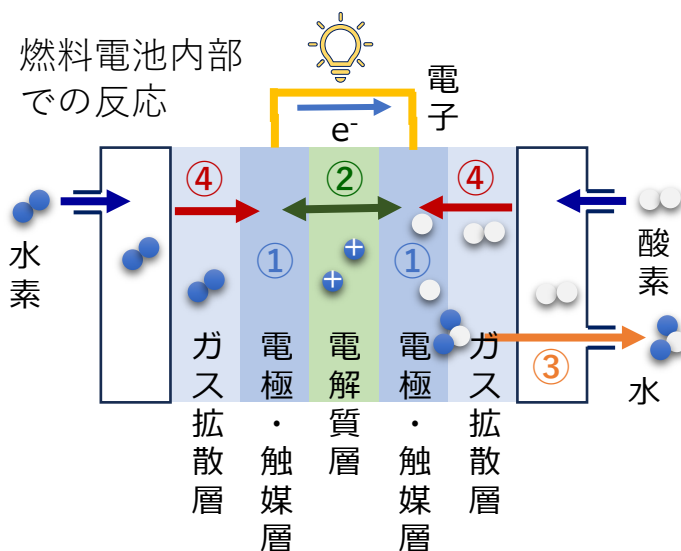
製造



貯蔵



活用



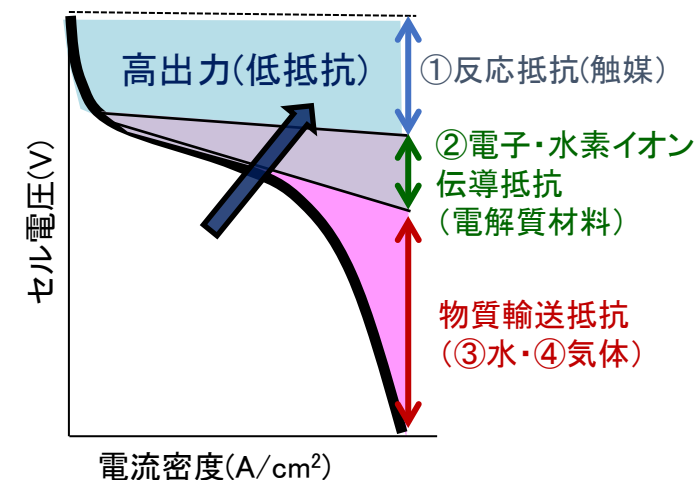
燃料電池: 水素と酸素を反応させて
電気を発生

水電解: 水の電気分解により水素
を発生

電力発生後の水は酸素の供給を妨害
✓ 排水の効率化
✓ 水の輸送抵抗を最小化

→ 高性能化には水の管理が重要

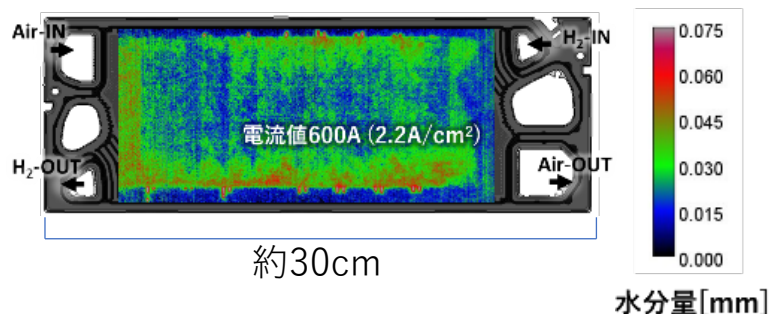
高出力化＝抵抗の最小化が必要



燃料電池・水電解可視化技術の高度化 –セル内部の水の動的挙動の観察–

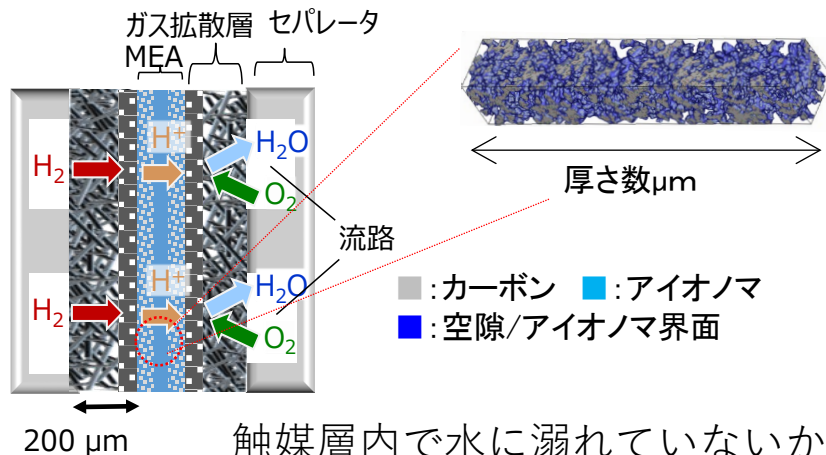
稼働状態の車載燃料電池内の水分分布 (100 μm ~ mm)

稼働状態の車載燃料電池内の水分分布



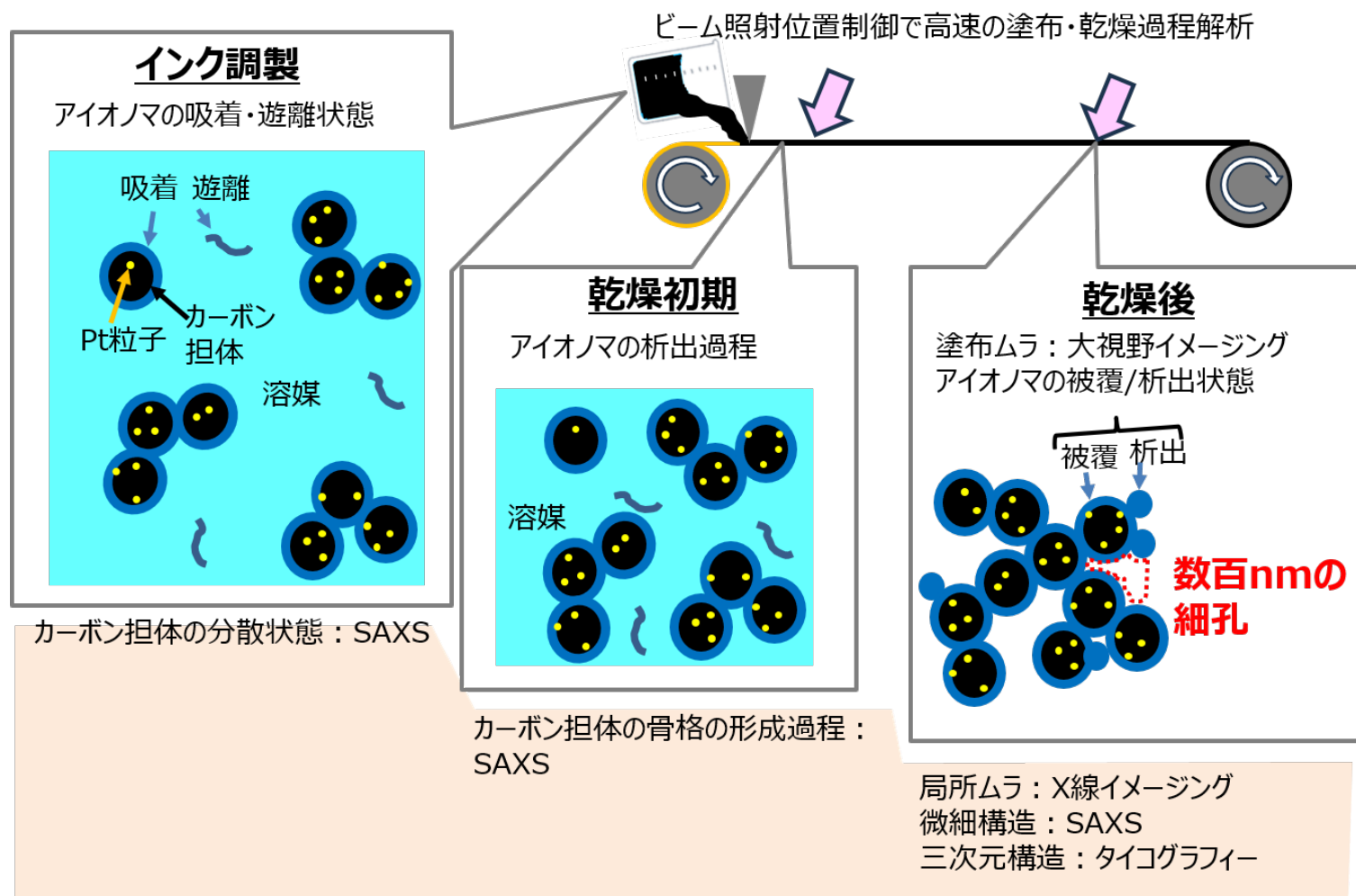
水分分布(定常状態)の発電量に応じた変化を観察

燃料電池触媒層内の水 (数100nm ~ μm)



触媒層内で水に溺れていないか？
これまでに観測できない領域

燃料電池触媒層製作のプロセス解析 (数nm ~ 数100nm)



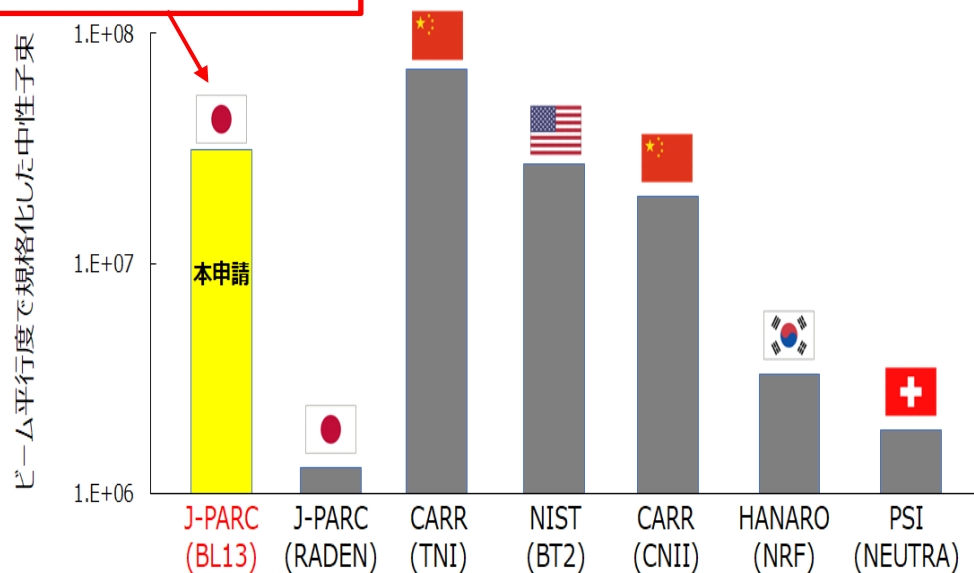
塗布・乾燥過程で触媒層の性能が変わる。アイオノマの被覆・析出はSANSで捉えられるが、3次元的な構造はSANSでは大きすぎ、イメージングでは小さすぎるため、これまで分かっていない。

世界の中性子イメージング装置の中の新設BL13の位置づけ

ラジオグラフィー

一般には
連続的な中性子ビームに利点

パルス中性子施設の装置でも
世界の原子炉設置の装置に
比肩する性能



水氷識別



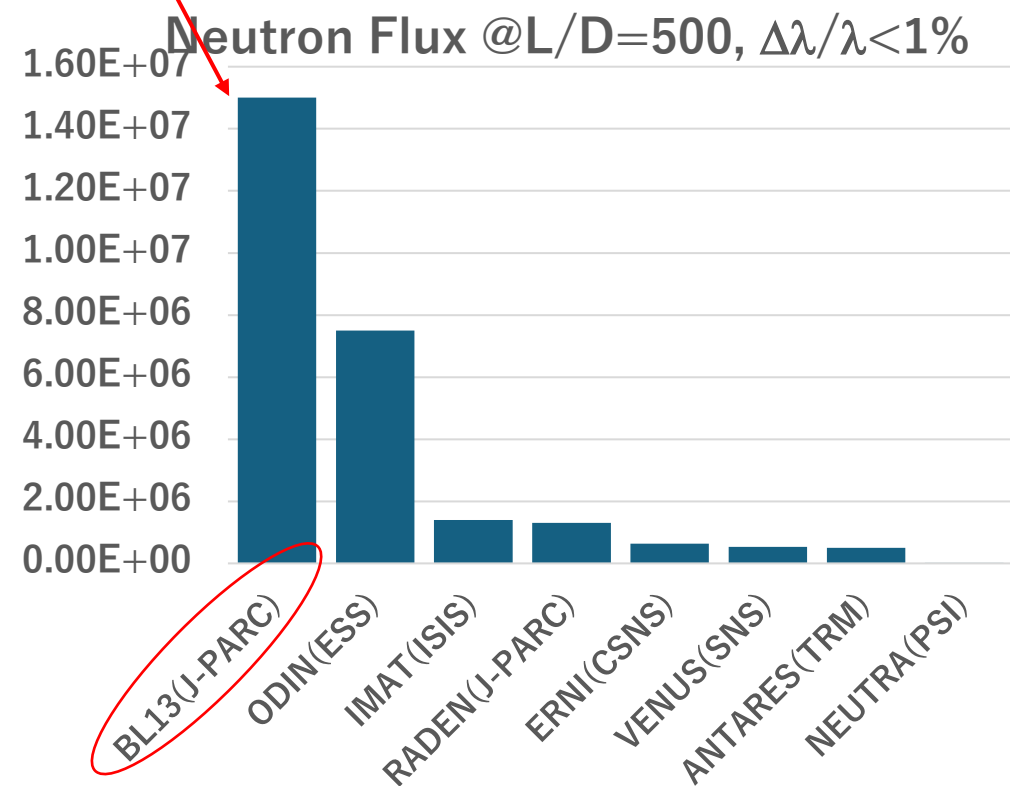
SANSによる
プロセス解析



エネルギー分析型イメージング

パルス中性子施設でのみ実現可能

世界最高強度
BL22 RADENの10倍



世界のSE-SANS装置の中の新設BL13の位置づけ

BL13では、
数 μm 程度までの構造情報を数十秒の
時間分解能で解析することを目指す

	英国ISIS	J-PARC	
繰り返し周期：	10Hz	25Hz	2.5倍
パルス当たりの強度： (10^{12} n/(sr <pulse))< td=""><td>4</td><td>17.8</td><td>4.45倍</td></pulse))<>	4	17.8	4.45倍

パルス当たりの強度



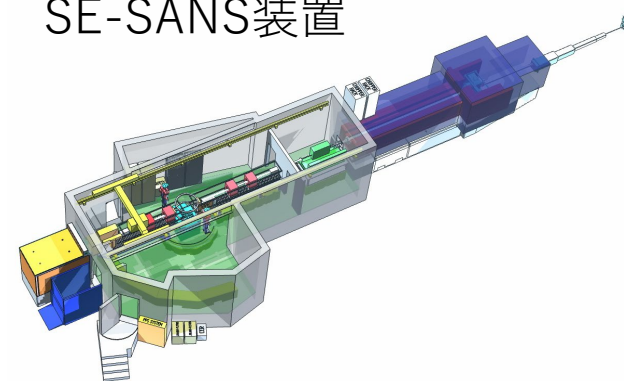
強度約11倍に！！



英国ISIS - TS2

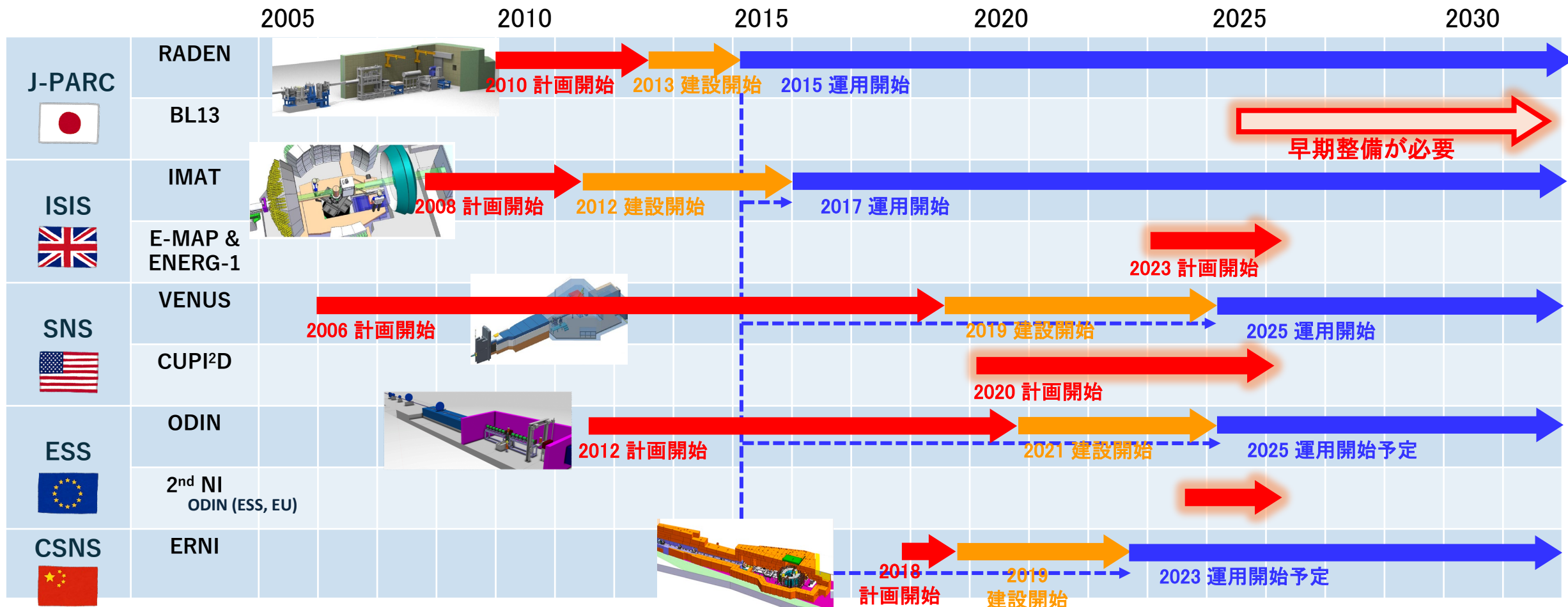
Larmor @ ISIS-TS2

世界で唯一の
SE-SANS装置



世界のパルス中性子イメージング装置の建設状況

J-PARCのRADENはパルス中性子イメージングでは世界のフロントランナー



ISIS, SNS, ESSではすでに2台目のパルス中性子イメージング装置の計画が開始

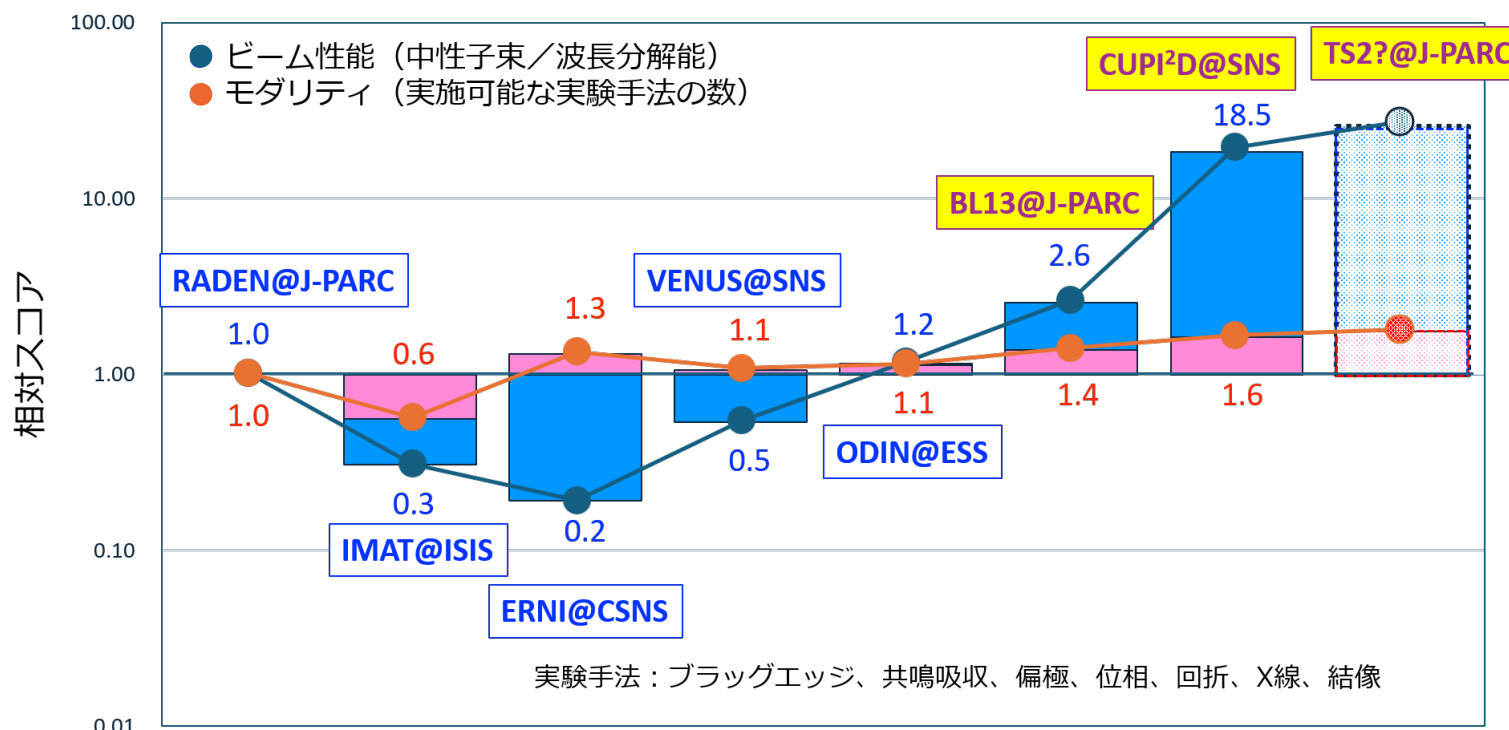
- ✓ E-MAP, ENERG-1 (ISIS) は Endeavour プログラムを開始
- ✓ CUPID (SNS) は第2ターゲットステーションに建設する最初の8台に選出
- ✓ ESSは大強度イメージング装置の検討を開始

世界のパルス中性子イメージング装置の建設性能比較

これまで世界はJ-PARCのRADENに追いつこうとしてきた。ビーム性能の差を実験手法の数でカバー。ESSが稼働すれば、初めてRADENを超える装置が出てくる。

	RADEN	IMAT	ERNI	VENUS	ODIN	BL13	CUPI ² D	TS2?
ブラッグエッジ	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
共鳴吸収	◎	×	◎	◎	×	◎	◎	◎
偏極中性子	◎	△	△	△	◎	◎	◎	◎
位相コントラスト	○	×	◎	○	◎	◎	◎	◎
中性子回折	○	◎	◎	○	○	○	○	○
即発ガンマ線分析	○	×	×	×	×	○	×	○
X線イメージング	×	×	◎	◎	◎	×	◎	◎
結像光学系	×	×	×	×	×	○	◎	◎

◎ : 実施可能／標準装備
○ : オプション機能
△ : デモンストレーション済
× : 実施不可



世界との競争力の維持には
BL13の早期実現が必須

さらに次世代高輝度ターゲットは状況を一変させる。TS2の実現は2030年代に世界で勝ち続けるために重要な選択。

今後のMLF double計画の道行（案）

FY2025
(R7)

FY2026
(R8)

FY2027
(R9)

FY2028
(R10)

FY2029
(R11)

FY2030
(R12)

国家
プロジェクト

燃料電池・水電解NEDO

既存BLを用いた燃料電池フルセルイメージング継続、水電解への展開
プロセス解析への要素技術確立・試料周辺装置製作

プロセス解析の手法確立

最終報告

飛躍的ユーザー拡大

燃料電池・水電解
ロードマップ
2030目標を達成

GTeX

既存BLを用いた技術開発、オペランド実験、Wallaston Prismの実証実験

ステージゲート

中性子実験への潜在的
ユーザー取り込み

建設材料エコシステム・地域防災研究

既存BLでの巨視的・微視的アプローチ

継続的に共同研究ベースの取り組み

J-PARCの
MLF double計画
(新規BL部分)

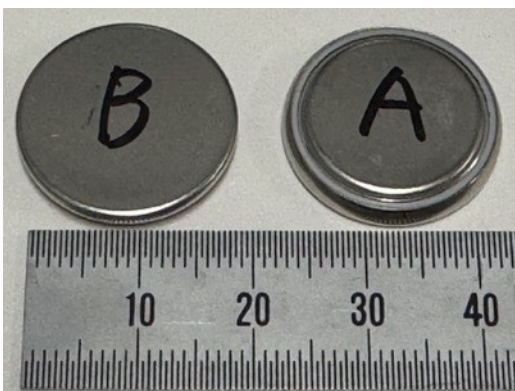
速やかな
要素技術開発

BL13の増設

国家プロジェクトの
目標達成に外せない
タイミング

參考資料

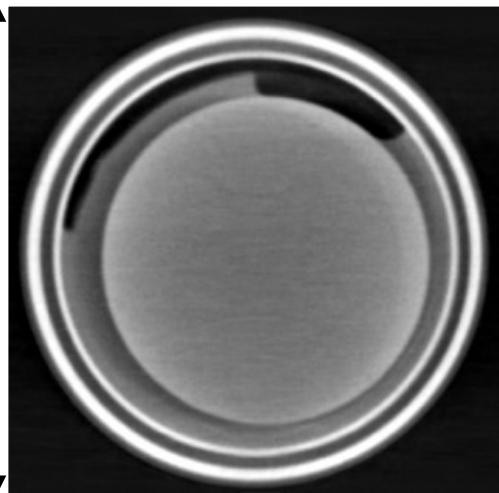
蓄電池分野への中性子の貢献 -コイン型Li電池の3次元観察-



20mm



コイン電池の構造



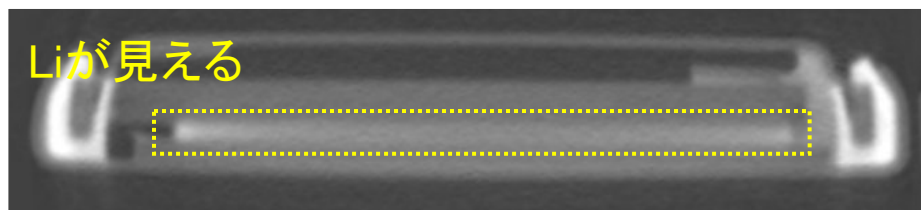
中性子CT

X線CT

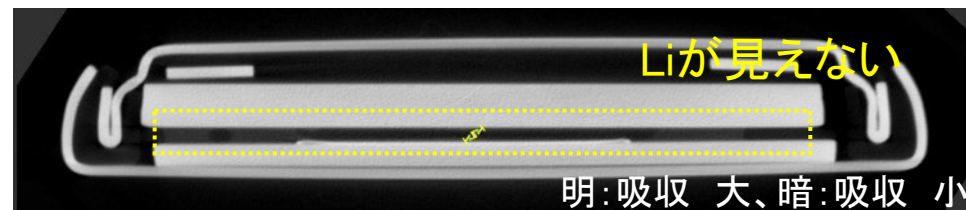


現状

- 中性子ではLiが視認できる
- X線では金属部品が、中性子はLiと樹脂がよく判別できる
- X線の画像は中性子の画像よりも鮮明
X線CTの分解能5 μm
中性子CTの分解能60 μm

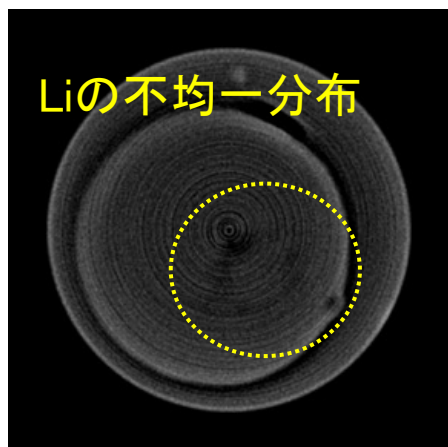


Liが見える



Liが見えない

明:吸収 大、暗:吸収 小



Liの不均一分布

中性子ラミノグラフィ
(分解能20 μm)

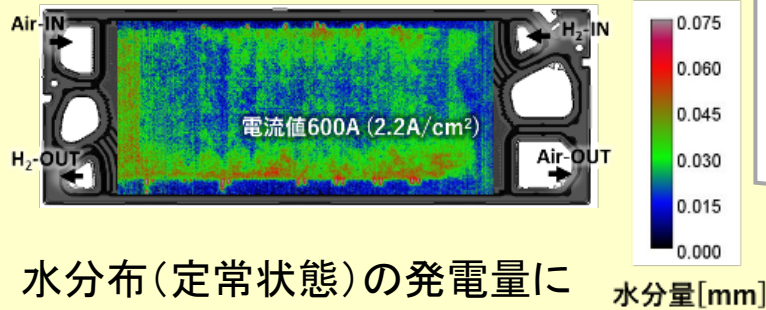
BL13でできること

SE-SANS/高空間分解能中性子イメージングの実現により、数 μm の分解能でLiや水素などの軽い元素が観察可能に

- ✓ 電池内部のLiの挙動を数 μm の分解能で直接観察
 - ✓ 充放電の繰返し時の析出Liの形状の変化、Liの溶解・析出の可逆性を解析することで、電池の劣化状態を評価
- Li電池のサイクル特性の向上・高出力化の実現に貢献

燃料電池・水電解可視化技術の高度化 -セル内部の水の動的挙動の観察-

稼働状態の車載燃料電池内の水分分布を可視化(BL22)



水分分布(定常状態)の発電量に応じた変化を観察
(撮像時間~2分)

空間分解能 (μm)

1
10
100
1000

100

時間分解能 (秒)

10

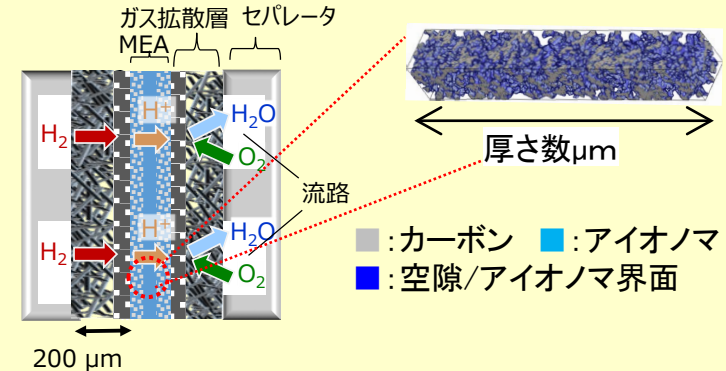
1

0.1

BL13

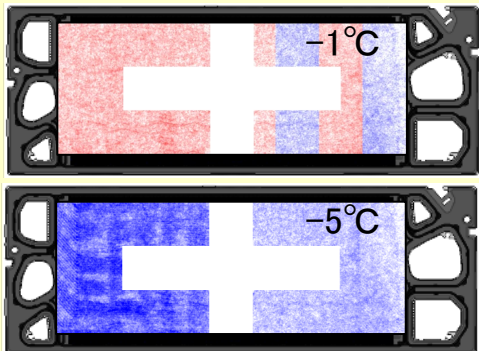
BL22

触媒層内の水の可視化(μmスケール)



BL13の建設により、
燃料電池内部の水/氷の分布・
動的挙動を「短時間・高分解能」
で観察可能に

燃料電池内での水の凍結挙動の可視化



中性子エネルギーを選択した
イメージングにより
液水(動きやすい水)と
氷(動きにくい水)を識別

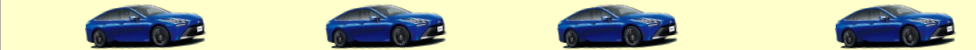
氷点下環境での燃料電池運転
を模擬 →

赤: 液水、青: 氷

加速時の車載燃料電池内部の水の動的観察



アイドリング, 0 km/h 3秒, 30 km/h 10秒, 60 km/h 20秒, 120 km/h



建設材料に対する中性子の貢献 -コンクリート中の水の研究-

社会的背景 コンクリート分野におけるカーボンニュートラル・循環経済の実現

- 低炭素型コンクリートの活用(CO_2 排出量削減)
- 環境配慮コンクリートの社会実装(コンクリート再生・再利用)
- 高経年化対策(腐食対策／補修・修繕技術／新規鉄筋材料導入)

令和7年3月14日国交省プレスリリース

https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001188.html

中性子の活用 コンクリート内部での水分挙動の評価

- 低炭素型コンクリートの材料性能の多角的評価
 - … 乾燥収縮の問題や耐久性の課題の解決
- 腐食原因の理解／補修・修繕技術の評価
 - … ITZ(境界層: Interfacial Transition Zone)の存在



令和7年3月14日
大臣官房技術調査課

低炭素型コンクリートの活用が全国的に拡大中！

～公共工事でのカーボンニュートラルに資する製品の積極的な活用～

一旦整備されると長期間にわたって供用されるインフラ分野においては、ライフサイクル全体の観点から、供用・管理段階でのインフラサービスにおける省エネ化のみならず、建設施工段階において省 CO_2 に資する材料活用等の脱炭素化に向けた取組を強化する必要があります。このため、国土交通省発注工事において、全国的に低炭素型コンクリートの活用を進めています。

- ✓ コンクリート強度の発現はセメントの水和反応に起因
- ✓ 水和によりセメントに束縛された水の挙動・空間分布の評価が低炭素型コンクリートの材料性能向上に必要
 - 中性子エネルギー分析型イメージング
- ✓ ITZ(セメント系材料との複合材料に存在する数 μm ～ 数 $10 \mu\text{m}$ の界面)における水分移動がコンクリートの機械強度や腐食に関係
- ✓ 新しい技術の社会実装には、定量的評価による科学的根拠に基づく説明が不可欠

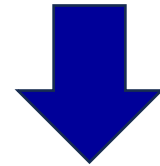
→ SE-SANS/高空間分解能中性子イメージング

防災・減災への中性子による貢献

社会課題

自然災害(豪雨・融雪水、大型台風、地震)の大規模化

土砂災害(斜面崩壊、土石流発生・堤防決壊・洪水)の更なる増加の懸念



土砂災害には地盤・土壌中を流れる水が強く関与
→ 水の挙動は災害発生を予測する上で重要な情報

土壌の種類・性質(ex.砂と粘土)、含水状態により水の流れ方が異なる

・水道の可視化

・水の状態の識別(吸着水・毛管水・自由水)

これまでの
アプローチ

技術1

・水の巨視的動的挙動の
3次元可視化
(mmオーダー)

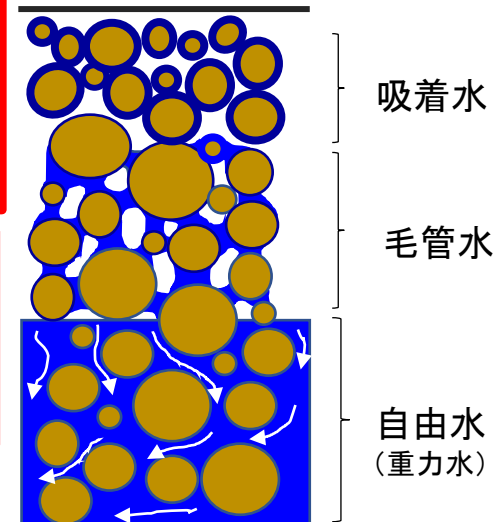
BL13での
アプローチ

技術2

・高分解能CTによる水道
の3次元可視化

技術3

・中性子エネルギー選別による
束縛水／自由水の識別



粘土
(ベントナイト)

砂
(豊浦砂)

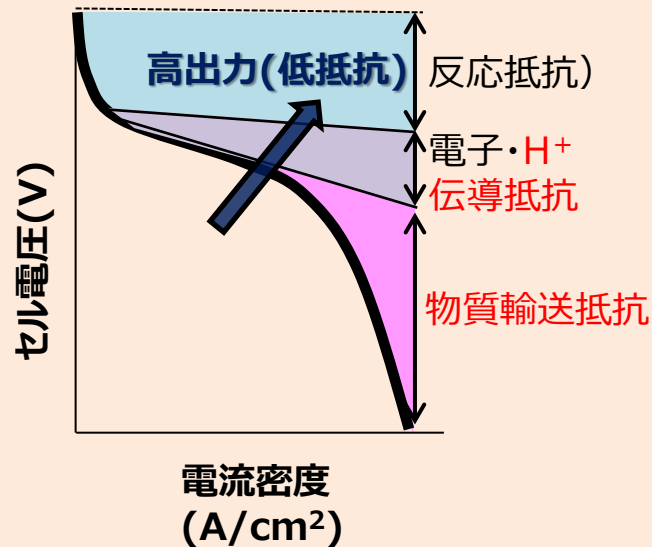
J-PARCでの砂、粘土中の水
の分布の可視化実験

地盤工学の観点から土壌中での水の流れを体系化することで、
シミュレーションによる災害予測の精度向上に期待

SANSの活用：燃料電池触媒層製作のプロセス解析

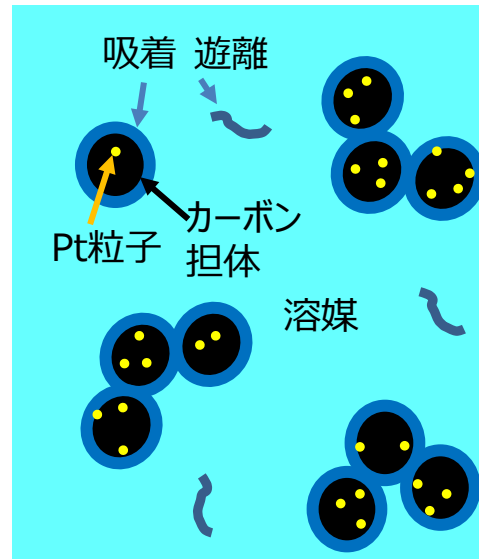
開発への活用

- ・プロセスパラメータの影響を理解。
- ・ H^+ 、物質輸送抵抗を最小化。
- ・将来のドライ塗工にも対応するため、**製造時の CO_2 低減**も可能。



インク調製

アイオノマの吸着・遊離状態



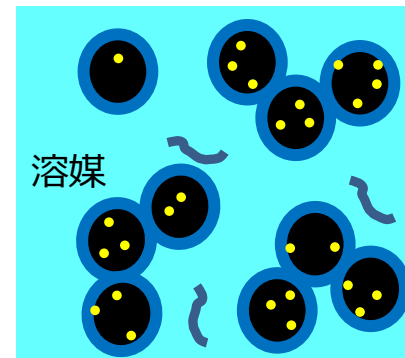
カーボン担体の分散状態：SAXS

新設BLの大容量スペースが必要

ビーム照射位置制御で高速の塗布・乾燥過程解析

乾燥初期

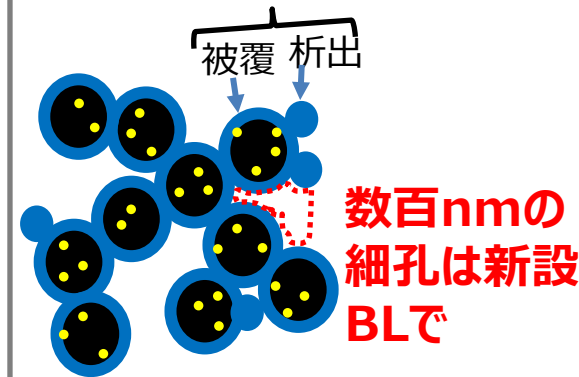
アイオノマの析出過程



カーボン担体の骨格の形成過程：SAXS

乾燥後

塗布ムラ：大視野イメージング
アイオノマの被覆/析出状態



局所ムラ：X線イメージング
微細構造：SAXS
三次元構造：タイコグラフィ

SPring-8, ナノテラスとの相補利用

SANSの活用：DX×PI×自動自律実験→プロセス決定

現象理解に基づいたプロセスパラメータの最速決定を可能に。

フィードバック制御

材料・調合比

×

超音波強度

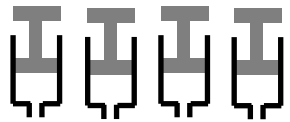
×

乾燥時の温度・風量

=

構造

送液ポンプ



超音波



中性子



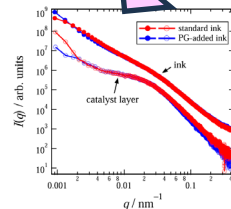
中性子



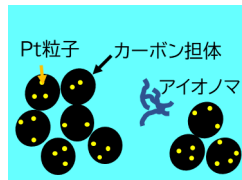
熱風



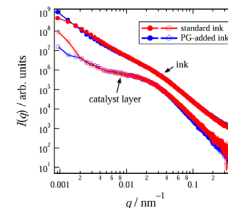
中性子



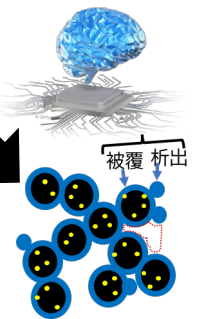
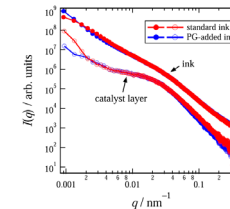
機械学習による
高速解析



カーボン粒子の開催・分散過程
アイオノマの析出過程



カーボン骨格の形成過程
アイオノマの析出過程



塗布ムラ、微細構造
アイオノマの被覆/析出状態

CN、GXへの中性子の貢献 燃料電池・蓄電池開発

FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ（FCスタック [2/2]）

現在	2025年度	2030年度	2035年度	2040年度
		2030年目標	2035年目標	2040年目標
I-V要求性能[kW]		BOL:0.77V@1.53 A/cm ² EOL:0.72V@1.76 A/cm ²	BOL:0.781V@2.18 A/cm ² EOL:0.706V@2.37 A/cm ²	BOL:0.86V@2.29 A/cm ² EOL:0.81V@2.44 A/cm ²
温度範囲(運転)	~90-95°C	-30°C~120°C	-30°C~125°C	-30°C~125°C
耐久性能		50,000 h	50,000h	50,000h
主要材料目標 ¹				
空気層PI目付量	0.17 mg/cm ²	0.20 mg/cm ²	FCV:0.1 mg/cm ² HDV:0.178 mg/cm ²	0.12 mg/cm ²
空気層無膜重量活性	500 A/g @80°C, 100%RH	1,740 A/g @80°C, 100%RH	4,630 A/g @80°C, 100%RH	19,000 A/g @80°C, 100%RH
PI膜解速度		1倍	1/2倍	1/2倍
電解質膜厚さ		8μm	5μm	1μm
電解質70%伝導率	0.106 S/cm @80°C, 80%RH	0.12 S/cm @80°C, 80%RH	0.05 S/cm @120°C, 30%RH	0.15 S/cm @55°C~125°C, 12%RH
ガス拡散抵抗	0.018 S/cm @120°C, 30%RH	0.032 S/cm @120°C, 30%RH	26 s/m @80°C, 80%RH	26 s/m @80°C, 80%RH
目標達成に向けた技術開発課題 ²				
材料系 ³				
(Pt-C)	立派な材料開発、材料系開発	高耐久、生産性向上、高活性材料の開発、PIAGの開発、2.5μmの材料の開発、高活性でMEAを構築可能な電解質、Pt/Cの削減		(注)材料のPt/Cの削減、科学的な理解に基づく材料系開発
(Pt-C)	高耐久、生産性向上、高活性材料の開発	高耐久、生産性向上、高活性材料の開発		
(Pt-C)	高耐久、生産性向上、高活性材料の開発	高耐久、生産性向上、高活性材料の開発		
材料の研究開発のためのDX活用				
DX技術開発				
DX技術を標準的に使用				
現象・機構解析				
(解析)				
(計算科学)				
PFAS規制(案)				

燃料電池開発のロードマップにおいて、2030年までに高度現象解析技術、材料開発プロセス解析への中性子の適用が謳われている

Gtex バイオものづくり
革新的GX技術創出事業

蓄電池領域：実用電池の革新と次世代蓄電池技術の創出

革新的な次世代蓄電池技術開発のため、学理の構築から産業界における技術課題の解消までシームレスに取り組む

水素領域：水素機能の本質理解に基づく水素イノベーション

水素の製造、貯蔵から利用に関わる先進的技術の開発により、水素社会の実現に貢献

二つの領域でGTeXに関与

J-PARCセンター、JAEA、KEK、CROSS

