

新試験研究炉への期待

中性子産業利用推進協議会・研究開発委員会
久米 卓志（花王）

2024年4月18日

中性子産業利用推進協議会

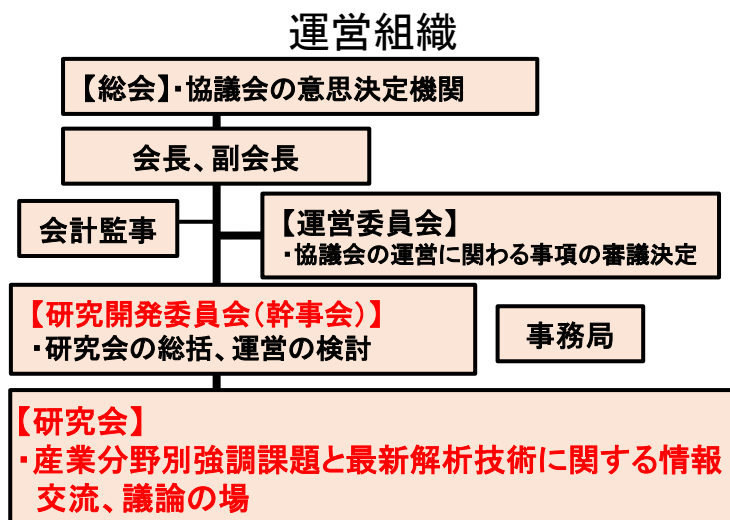
- ・高性能・新機能製品の開発により産業の先進性を高めるために、大型中性子施設である「J-PARC MLF」と「JRR-3」の活用を施設と連携して推進する民間企業中心の団体
- ・中性子の産業利用を促進する観点から、研究会、講習会、セミナーなどを開催し、様々な情報を提供

J-PARC MLF



JRR-3

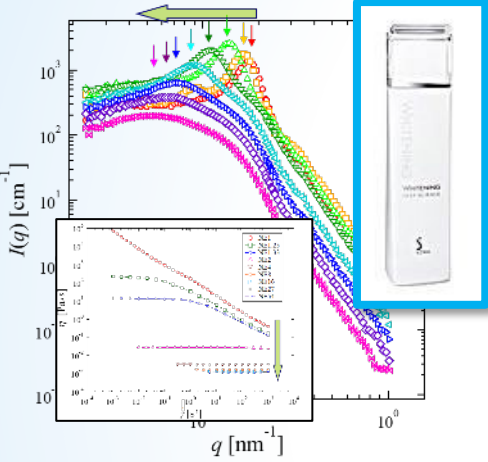
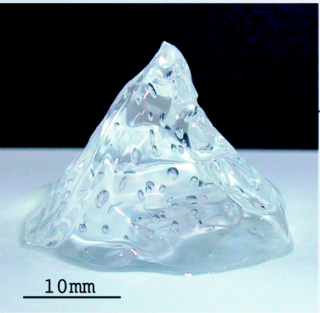
2023年7月現在



産業分野	会員企業名
電機/電器(2)	東芝*、日立製作所
半導体/デバイス(1)	村田製作所
精密機器(1)	リコー
鉄鋼/特殊鋼(4)	神戸製鋼所、JFEスチール、大同特殊鋼、日本製鉄
金属/電線/材料(4)	住友電工、古河電工、プロテリアル、三菱マテリアル
自動車/自動車部品(8)	トヨタ、日産、本田技研、ヤマハ発動機、デンソー、ジェイテクト、日本ガイシ、矢崎総業
ゴム/タイヤ(3)	住友ゴム、ブリヂストン、横浜ゴム
化学(14)	旭化成、インキュベーション・アライアンス、ENEOS、クラレ、JSR、住友化学、DIC、大日本印刷、日華化学、日産化学、日本ゼオン、富士フィルム、三井化学、三菱ケミカル
日用品/化粧品(1)	花王
食品(1)	味の素
分析/研究支援(10)	コベルコ科研、住重アテックス、千代田テクノル、東レリサーチセンター、豊田中研、日産アーク、日鉄テクノロジー、NAT、日立ハイテク、VIC
公的機関/団体(3)	産総研、物材機構、理研
計	52会員(49社・3研究機関)

*)推進協より吉岡氏(東芝)が新試験研究炉のコンソーシアム参画機関委員に就任

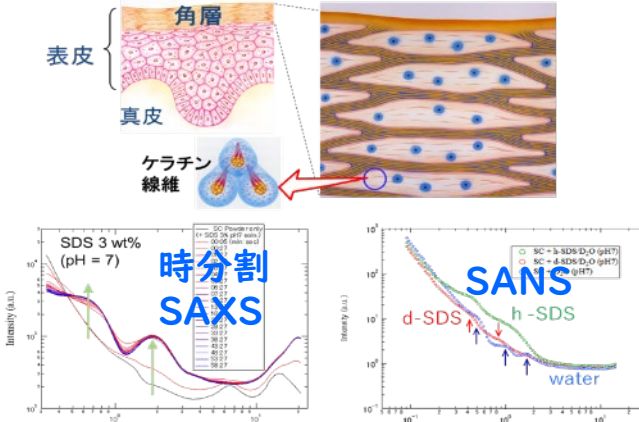
ナノサイズエマルジョンのSANS, Rheo-SANS



@ JRR-3 SANS-U

Langmuir 26, 2430 (2010), J. Chem. Phys. 127, 144507 (2007)
波紋 20, 110 (2014), 24, 111 (2014), 高分子 65, 128 (2016)
日本中性子科学会 第11回技術賞(2013年)

界面活性剤での皮膚角層構造変化

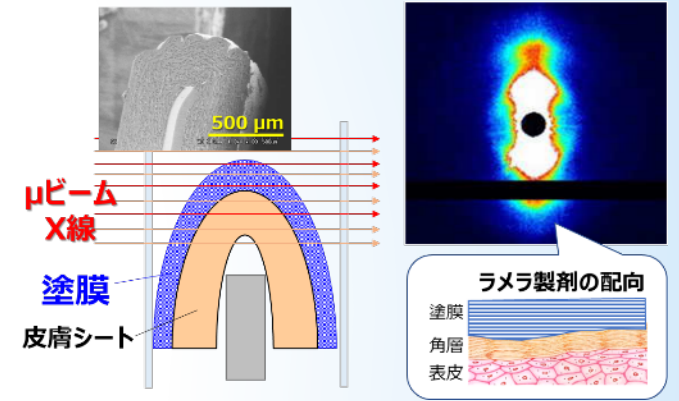


@ SPring-8 BL40XU

@ J-PARC MLF 大観

波紋 24, 15 (2014), 30, 32 (2020)

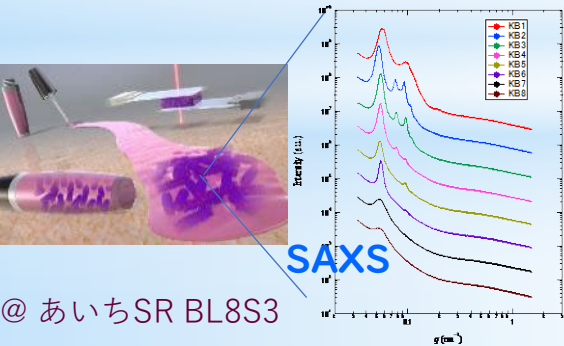
皮膚・製剤塗膜構造のμビームSAXS



@ SPring-8 BL40XU, BL46XU

あいちSR光センター研究会講演集 #11 2020/8/5

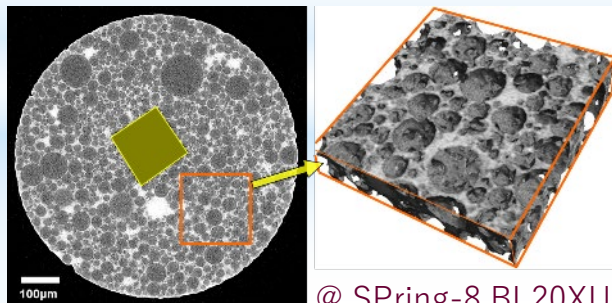
感触制御用ポリマーの マイクロ相分離構造解析



@ あいちSR BL8S3

Polymer Journal 52, 1085 (2020)

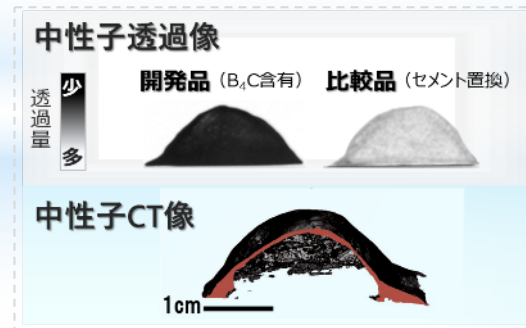
エマルジョンの単色X線CT



@ SPring-8 BL20XU

C & I Commun 34, 16 (2009)

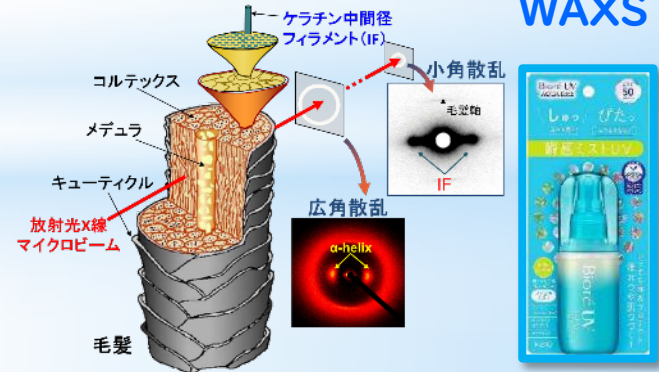
中性子吸収材のイメージング



@ KUANS, J-PARC MLF 螺鈿

オレオサイエンス 20, 459 (2020)
波紋 30, 32 (2020)

毛髪構造のμビームSAXS・WAXS



@ SPring-8 BL24XU, BL40XU, BL46XU

第89回SCGJ研究討論会(2022年12月)
第22回ひょうごSPring-8賞(2023年) 田村俊紘

中性子の産業応用の狙い

- 優れたものづくりを通じて、持続可能な社会の実現と人々の幸福に貢献するために、高度な計測技術が欠かせない。
- 強力な中性子ビームを供給できる実験施設を有する我が国は、深い技術に支えられたものづくりで世界をリードすることができる。
- 日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構、大学、学会等との緊密な産学官連携のもとに相乗効果を発揮する。

中性子の優れた特徴

- 物質透過性が高い
- リチウムや水素などの軽元素測定に有利
- 同位体を見分ける
- 物質構造を測定できる
- 磁気構造を測定できる
- 物質の動き（運動）を見やすい

これらの特徴を生かして、X線、電子顕微鏡などと
ともに、産業界でも広く用いられるようになった。

産業界の中性子の利用例

1) Li電池の高性能化	充放電中のLi電池内部の反応を直接観測 全固体Liイオン電池材料の開発	オペランド回折 粉末結晶構造解析
2) 燃料電池の高性能化	燃料電池における水と氷の識別 新型電解質材料の開発 生成水の挙動解析	中性子イメージング 高分解能中性子回折 中性子イメージング
3) 金属材料の高性能化	スパイラルシーム鋼管の残留応力測定 鉄鋼プロセスの最適化	中性子回折 結晶構造解析
4) 複合高性能材料の開発	自動車用タイヤ材料の開発 粒子分散系（インク・塗料）の評価 非溶解性中性子吸収材の評価 高分子材料の評価 サイト別磁気モーメント決定	中性子反射率/中性子 小角散乱 中性子トモグラフィ 中性子反射率 粉末結晶構造解析
5) 生物・生体材料の開発	構造生物学による創薬 人工腎臓膜の中間水	中性子小角散乱 中性子全散乱 準弾性散乱
6) デバイス・機器の 性能・信頼性向上	軸受内グリースの流動状態の可視化 電動機内の磁場分布 新規分子デバイスの提案 半導体ソフトウェアの現象把握	中性子イメージング 偏極中性子イメージング ミュオン顕微鏡 中性子・ミュオン照射

課題解決に向けた中性子・ミュオン応用計測の拡大

- **グリーンイノベーション** 2次電池、燃料電池、水素製鉄、バイオ燃料
- **最先端半導体技術開発** 2 nm & Beyond、パワーデバイス
- **輸送機器の電化、軽量化, 高信頼化** 自動車、航空、船舶、宇宙
- **健康増進** タンパク質構造解析、創薬、食糧
- **革新材料の開発** 高機能・高性能複合材料
- **インフラ予防保全** コンクリート構造物の非破壊検査

協議会の主な活動

研究会

- 産業分野別研究会
- 解析技術研究会

講習会

- 中性子実験レベル1講習会
- 初級者向け、中級者向けZ-CODE講習会
- 産業応用セミナー（個別企業向け）

講演会

- 中性子産業利用報告会
- 中性子計測に関する主要テーマに関する講演会

情報発信

- 季報「四季」年4回発行
- メールングリストによる配信、ウェブサイトにおける掲示
- MLF成果検索システム（J-PARC）

文部科学省、茨城県、 JAEA、KEK、J-PARC との連携・調整

- 中性子産業利用促進のための制度、実験環境の整備
- 「要望書」の提出

ビジョン

日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構、J-PARC、関連学会との連携のもとに、中性子ビームを活用してものづくりの高度化を図り

- 持続可能社会の実現と人々の豊かさに貢献する
- 日本のものづくり産業の優位性を確保する
- 経済の安全保障の実現に寄与する

高度計測は、材料や製品の新機能、高性能、低コスト、環境親和性を実現するためのEssential Technology

中性子産業利用推進協議会で活動中の研究会

産業分野：4研究会、解析技術分野：7研究会の計11研究会が活動中

	研究会	主査	これまでの主な検討内容
産業分野	有機・高分子材料	大野正司(日産化学)	調湿環境下反射率、小角散乱、非弾性散乱
	金属材料	佐々木宏和(古河電工)	小角散乱による析出前駆現象、クラスタリング現象解析
	電池材料	佐々木巖(豊田中研)	電池活物質、固体電解質、電極触媒の構造解析
	生物・生体材料	上村みどり (量子構造生命科学研究所)	重水素ラベリングを用いたコントラスト同調SANSによる構造・ダイナミクス解析
解析技術分野	構造生物学	佐藤衛(CROSS)	中性子散乱・回折強度の高速測定及び自動測定
	液体・非晶質	吉田亨次(福岡大)	中性子、放射光、NMRの構造データを再現する3次元構造モデル構築
	ものづくり基盤	町屋修太郎(大同大)	国際核融合炉計画(ITER)のTFコイル、CSコイルの試験体のひずみ測定
	磁性材料	梅津理恵(東北大)	超伝導層状銅酸化物の酸素サイト占有率評価
	イメージング	原田久(ヤマハ発動機)	3次元トモグラフィーによるベアリング中のグリース評価
	小型中性子施設活用	大島永康(産総研)	インフラ構造物の劣化を非破壊で計測できるシステム構築
	小角散乱<実験デザイン・解析>	小泉智 (茨城大, CROSS)	小角及びイメージング併用評価・解析

中性子産業利用推進協議会における 研究会の将来ビジョン

協議会発足から15周年の節目として、各研究会ごとに5年毎のマイルストーンを設け、今後15年間の「将来ビジョン」を提案

- ・水素可視化/原子・分子レベル/マルチスケール、動的観察に資する解析装置・手法の開発
- ・上記を実現するための新規実験施設・新規装置の提案&建設推進
- ・大型施設・小型施設の複合利用、ラボレベルで利用可能な分析手法との相補利用の推進
- ・解析支援体制の構築、利用機会の創出

中性子利用のための実験施設・新規装置や解析手法を新規に提案・開発することで、新規産業分野の開拓や既存産業分野の飛躍に貢献する

有機高分子材料研究会

主査: 大野正司 (日産化学)

将来ビジョン

水素原子を特異的に検出するプローブである中性子計測により、高い国際競争力を持つ有機・高分子材料を開発し、持続可能な世界を実現させる

5年後

中性子と放射光X線(特に軟X線とテンダーX線)を相補的に利用した研究を推進する。計算科学や機械学習等との融合による計測技術の高度化及び材料開発を促進させる。

10年後

中性子計測技術のさらなる高度化と産業界への技術移転の推進と併せて、中性子利用企業の裾野を広げる。

15年後

高い国際競争力を持つ有機・高分子材料を継続的に生み出すために、中性子と放射光X線及びマテリアルズ・インフォマティクスが汎用的に用いられている。

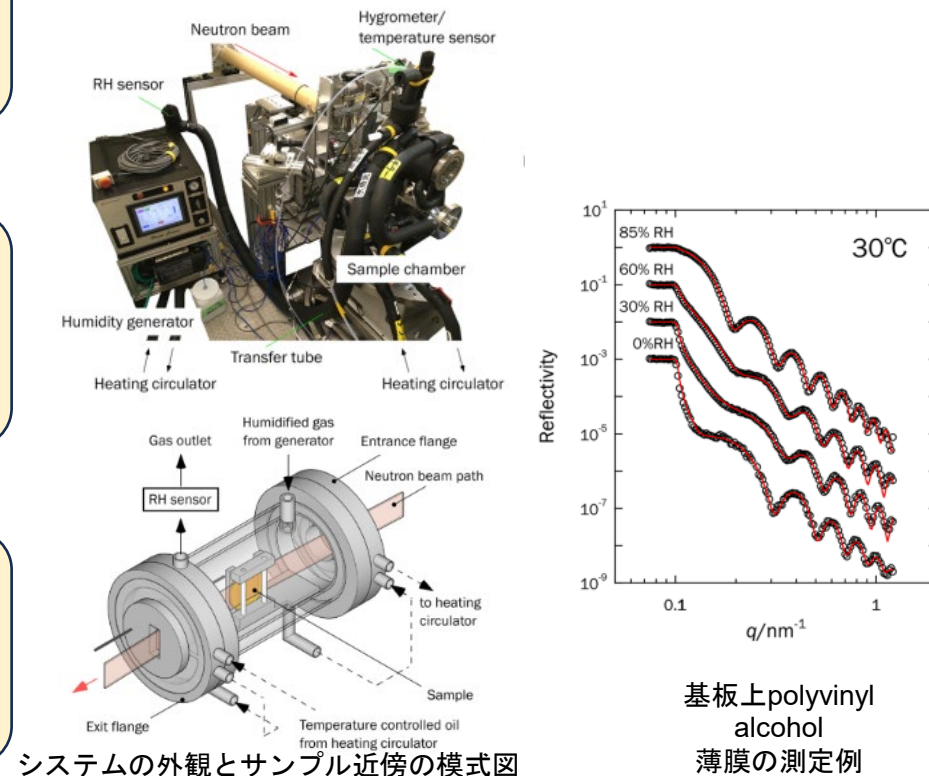
保有技術の一例

**85% RH (5~85 °C) まで調湿可能な
ガスフロー湿度コントロールシステム**

(Hiroshi Arima-Osonoi et al., Rev. Sci. Instrum. 91, 104103 (2020))

小角散乱や準弾性散乱でも調湿環境下での測定を可能とするシステムが稼働

・産業界で重要な高温高湿 (85 °C 85% RH) の信頼性試験にも対応可能



主査: 上村みどり(量子構造生命科学研究所)

主査: 佐藤 衛(CROSS)

将来ビジョン

未利用の水素原子を含む蛋白質分子の静的/動的構造情報を医薬品および食品の製品開発等に適用し、バイオ産業の育成を目指す / 建設計画中の新試験研究炉に生命科学専用のビームラインを設置し、All Japan体制で駆動する最先端複合研究施設の建設を目指す

5年後

国プロ(AMED-BINDS)を通じて新規ユーザーの中性子散乱・回折データの高速収集および蛋白質の重水素化技術および結晶成長技術の支援および高度化を推進。アカデミアや産業界を含め中性子利用の視点に立った数多くの構造生物学研究者やユーザーの獲得を目指す。

10年後

AMED-BINDS後継プロジェクトに参画し、構造生物学研究者や新規ユーザーの獲得を目指す。分光技術と分子動力学計算技術との相関構造解析により、水素原子を含む蛋白質の分子構造及び動的な挙動を解明する。新試験研究炉に全日本の体制で生命科学専用のビームラインを設置する。

15年後

水素原子を含む蛋白質の分子構造および動的な挙動を解明し、医薬品や食品の製品開発に適用して新規医薬品および新規機能性食品の開発の一翼を担う。

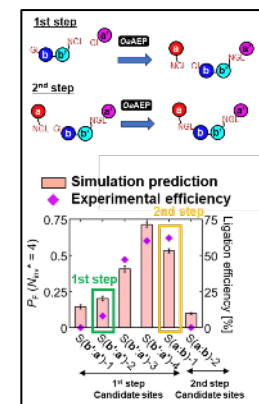
新試験研究炉に建設する生命科学専用ビームラインを基軸に、産学官で駆動する最先端の複合研究施設を全日本の体制で建設する。(J-PARC MLF, JRR-3の協力)

保有技術の一例

蛋白質分子の重水素化技術統合プロトコール(DANS)および区分重水素化技術



中性子散乱・回折強度測定のための統合プロトコール (DANS)



区分重水素化のための多段階ドメインライゲーション

中性子散乱・回折強度の高速測定技術および自動測定技術

【中性子散乱・回折強度測定】 結晶格子長、分解能、収集時期に応じて装置を選択

<p>最大格子長: 135 Å (3軸) データ収集: 1時間程度 最高分解能: 1.2 Å (最大格子長の場合)</p>	<p>最大格子長: 100 Å (3軸) (3軸: 高分解能モード) データ収集: 3時間程度 最高分解能: 1.5 Å (BIX-3) 1.4 Å (BIX-4) 0.8 Å (BIX-3: 高分解能モード)</p>
---	---

高度化

試料マウント調整システムの整備

高度化

BIX4ビームホールの移設

測定・処理・解析の高速化・自動化

最大格子長: 160 Å (3軸)

液体非晶質研究会

主査: 吉田亨次(福岡大学)

将来ビジョン

“原子・分子レベルの構造を観る”ことにより、マクロな物性や機能の発現メカニズムを微視的に解き明かし、エネルギー変換デバイスを始めとするカーボンニュートラル、グリーンイノベーション材料の開発に先導される産業を開拓する

5年後

中性子、ミュオン、放射光などの量子ビームを活用したマルチプローブ観測法の確立により、バッテリー材料などエネルギー関連材料の物性の発現機構を探る

10年後

機械学習を利用した物質構造探索により、様々なエネルギー関連材料について物質構造情報からの物性予測や新材料開発の効率性を上げる

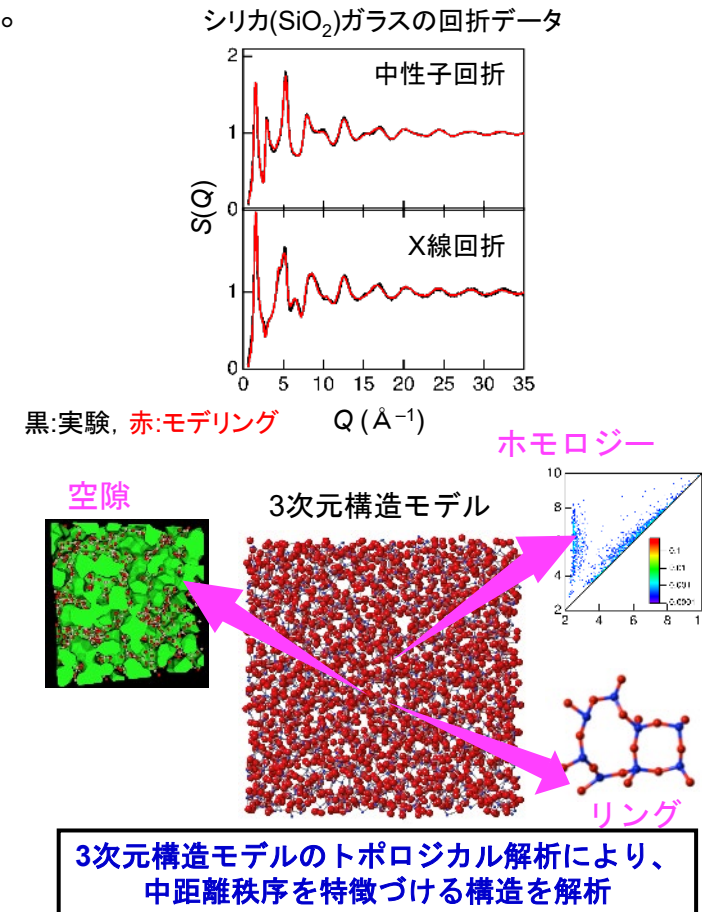
15年後

福井県の試験研究炉 J-PARC MLF 第2ターゲットステーションを利用した構造解析手法の高度化により、新しい機能性材料を創出し、社会・産業界のニーズに応える

保有技術の一例

構造データを用いたモデリング

NOVAで測定された中性子回折データを中心に、放射光X線回折、NMRから得られる局所構造情報等すべての構造データを忠実に再現する液体・非晶質の3次元構造モデルを構築し、最近接を超えたスケールでの構造解析を可能とする。



小型中性子施設活用研究会

主査:大島永康(産総研)

将来ビジョン

今までなかった“小型ならではの利用法”・“手軽で身近な利用機会”・“**大型や他量子ビームとの複合的な利用**”を提供することで、中性子の産業利用の拡大を目指す

5年後

小型中性子ならではの計測法の開発(その場測定、複合測定、長期測定、屋外利用、計測精度向上)

10年後

小型中性子施設を用いた産業利用計測事例の拡充(利用範囲の拡大、産業利用有用性の実証)
小型中性子施設の産業利用における有用性と役割の社会的認知

15年後

小型中性子施設の産業利用におけるビジネスモデルの構築とビジネスの推進

保有技術の一例

小型施設

北大: HUNS



発生技術

- 電子加速器を用いたパルス中性子源
- ポリエチレンまたは固体メタン減速材を用いた熱(冷)中性子発生法

理研: RANS



発生技術

- 陽子線加速器を用いたパルス中性子源
- ポリエチレンまたはメチレン減速材を用いた熱(冷)中性子発生法

産総研: AISTANS



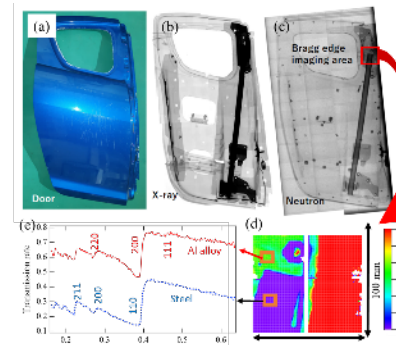
発生技術

- 電子加速器を用いたパルス中性子源
- 固体メタン減速材を用いた熱(冷)中性子発生法

製品/パーツの非破壊イメージング解析(AISTANS)

中性子とX線を複合的に用いる非破壊評価技術を開発

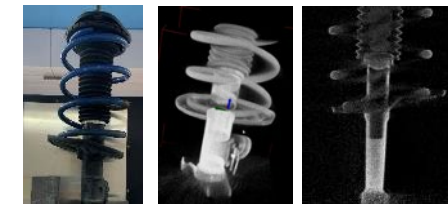
自動車ドアの評価例



自動車ドアの測定例: (a) 写真、(b) X線イメージング、(c) 中性子イメージング、(d) 波長選択中性子イメージング、(e) 中性子ブラッグエッジスペクトル例。

参考:
大島永康 他、軽金属, 第73巻, 3号, 117-127 (2023)

自動車ダンパーの測定例



自動車ダンパーの測定例: (a) 写真、(b) 中性子CT(外観像)、(c) 中性子CT(断面像: 鉄鋼材を透かしてオイルが白く見えている)

参考:
オートモティブワールド2023「第13回車の軽量化技術展: ISMAブース」
(2023年1月)

小角散乱<実験デザイン・解析>研究会

主査:小泉 智(茨城大)

将来ビジョン

各企業で保有する分析手法(X線装置、NMR電子顕微鏡など)に、中性子線の利用を加えることで、実用材料の微視構造に解き明かし、新しい産業を開拓する

5年後

中性子線やX線、電子線の相互利用の知識の習得、オリジナルな試料環境の構築など
小角散乱の解析技術の習得と構築

10年後

産業界の専用J-PARC ビームラインの提案

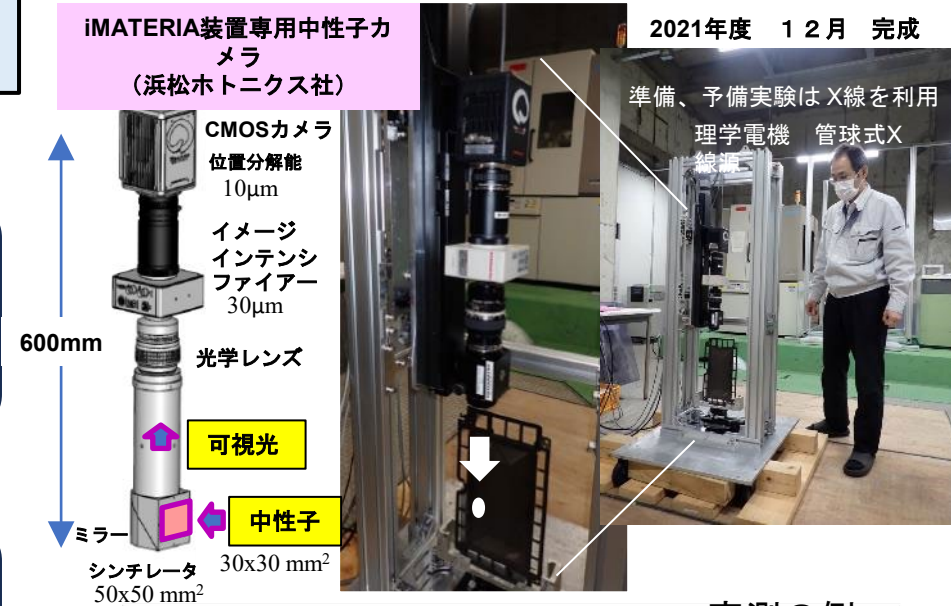
15年後

産業界の専用J-PARCビームラインの完成

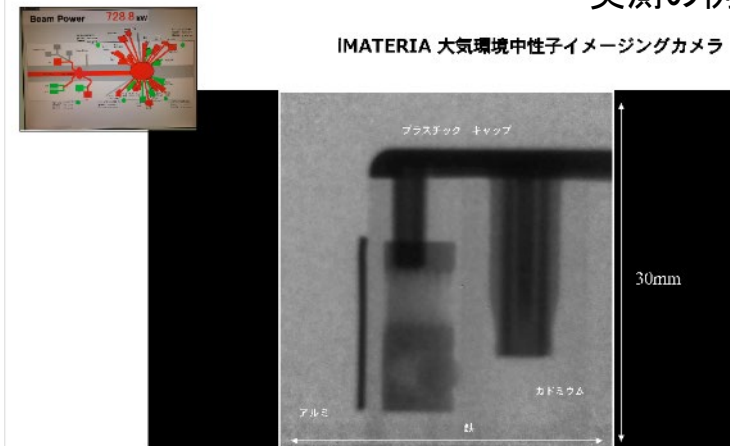
金属、無機、高分子システム手法の複合化

保有技術の一例

IMATERIA装置の中性子透視画像観察



実測の例



各研究会の将来ビジョンまとめ

研究会	将来ビジョン（抜粋）
有機高分子材料	水素原子を特異的に検出するプローブである中性子計測により、 高い国際競争力を持つ有機・高分子材料を開発し、持続可能な世界を実現 させる
金属材料	従来、 金属材料に適応されてこなかった中性子の解析手法を金属の未知構造解析に応用 する。 新しいサイエンスに根差した金属材料開発に寄与 する
電池材料	“実サイズ”の3次元+時間軸=4次元空間を自在に測定する ことを理想とし、電池内ダ付ミクスを材料/界面/電極/電池のマルチスケールで解き明かすことで、 電池産業の飛躍に原理から貢献 する
生物生体材料/ 構造生物学	これまで利活用されてこなかった 水素原子を含む蛋白質分子の静的及び動的構造情報を医薬品および食品の製品開発等に適用し、バイオ産業の育成を目指す 。建設計画中の 新試験研究炉に生命科学専用のビームラインを設置し、All Japanの体制で駆動する最先端の複合研究施設（Research Complex）の建設 を目指す
液体・非晶質	“原子・分子レベルの構造を観る” ことにより、マクロな物性や機能の発現メカニズムを微視的に解き明かし、 新材料の開発に先導される産業を開拓 する
ものづくり基盤	基幹産業と先端科学技術の双方 において 問題解決・発展に貢献できる支援体制や実験環境の構築
磁性材料	“今まで見えなかったものを観る” ことにより、物質のマクロ現象のメカニズムを微視的に解き明かし、 新しいサイエンスに根差した産業を開拓 する
イメージング	部品やシステムの 構造情報を広範囲に得るための「可視化」「定量化」技術 によって 製品機能の創成および高度化に貢献 する
小型中性子施設 活用	今までなかった 小型ならではの利用法・手軽で身近な利用機会・大型や他量子ビームとの複合的な利用 を提供することで、 中性子の産業利用の拡大 を目指す
小角散乱	各企業で保有する 分析手法（X線装置、NMR、電子顕微鏡など）に、中性子線の利用を加える ことで、 実用材料の微視構造を解き明かし、新しい産業を開拓 する

産業利用のユーザーからの希望

産業利用のユーザーにとって試験研究炉は..

- ①必要なデータが得られるもの
 - ②施設が使い易いもの
- であって欲しい

① : JRR-3やJ-PARCに遜色ないデータが得られること

中型でもこれまでの技術開発で、小型よりも十分高く大型に迫る精度が可能になるのでは
中性子利用に詳しくないユーザーに向けた、取得データの解析サポート体制の構築

② : 利用機会・頻度の向上のための制度・設備

J-PARC 年2回・JRR-3 年2回の申請・利用 ⇒ SPring-8 産業利用（年6回）のように

J-PARCの茨城県ビームライン、SPring-8兵庫県ビームラインのような地元ビームラインの設置

まとめ

「中性子推進協研究会の将来ビジョン」や
「産業利用ユーザーからの希望」で示しましたように
新規産業分野の開拓・既存産業分野の発展のため
新試験研究炉に大いに期待しております