



JAEA-Review 2018-032

J-PARC 18-03

DOI:10.11484/jaea-review-2018-032

## MLF将来計画技術検討会・中性子実験装置発表 資料集

Presentation Materials Related to Neutron Instruments  
in the Technical Study Meetings for Future MLF

(編)中島 健次 ステファヌス ハルヨ 山田 悟史  
及川 健一 梶本 亮一

(Eds.) Kenji NAKAJIMA, Stefanus HARJO, Norifumi YAMADA  
Kenichi OIKAWA and Ryoichi KAJIMOTO

原子力科学研究部門  
J-PARCセンター  
物質・生命科学ディビジョン  
Materials and Life Science Division  
J-PARC Center  
Sector of Nuclear Science Research

February 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JAEA-Review 2018-032

J-PARC 18-03

## MLF 将来計画技術検討会・中性子実験装置発表資料集

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 J-PARC センター  
物質・生命科学ディビジョン

(編) 中島 健次、ステファヌス ハルヨ、山田 悟史\*、及川 健一、梶本 亮一

(2018 年 12 月 26 日受理)

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) では 2017 年より「MLF 将来計画技術検討会」が設置され、MLF の線源や実験装置の将来計画について議論が行われてきた。同検討会では中性子実験装置についても装置カテゴリ毎に現状の問題点や今後目指すべき方向性についての報告がなされた。本報告書は、今後の将来計画の検討の一助とするべく、同検討会における MLF 中性子実験装置に関する発表資料をまとめたものである。

---

J-PARC センター：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

\* 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

JAEA-Review 2018-032

J-PARC 18-03

## Presentation Materials Related to Neutron Instruments in the Technical Study Meetings for Future MLF

(Eds.) Kenji NAKAJIMA, Stefanus HARJO, Norifumi YAMADA\*,  
Kenichi OIKAWA and Ryoichi KAJIMOTO

Materials and Life Science Division, J-PARC Center, Sector of Nuclear Science Research,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 26, 2018)

A series of meetings to discuss future neutron/muon sources and instruments at Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) in Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) has been held since 2017. Each of the neutron instrument groups in MLF proposed required features for future instruments, while addressing issues of the current instruments and facilities. This report compiles the presentation materials presented by the neutron instrument groups in the meetings to help future discussion for the coming MLF.

Keywords: J-PARC, MLF, Neutron Instruments

---

\* Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

## 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| はじめに .....                     | 1  |
| 1. これまでの検討について .....           | 3  |
| 2. 結晶構造グループ .....              | 10 |
| 3. ナノ構造グループ .....              | 20 |
| 4. パルス中性子応用グループ .....          | 28 |
| 5. 分光グループ .....                | 33 |
| 付録 MLF 中性子装置グループと中性子実験装置 ..... | 43 |

## Contents

|   |    |
|---|----|
| Preface .....   | 1  |
| 1. Summary of Previous Studies .....                                    | 3  |
| 2. Crystal-Structure Group .....  | 10 |
| 3. Nano-Structure Group .....   | 20 |
| 4. Pulsed Neutron Application Group .....                               | 28 |
| 5. Spectroscopy Group .....   | 33 |
| Appendix Neutron Instrument Groups and Neutron Instruments in MLF ..... | 43 |

## はじめに

大型施設にとって次期計画を常に検討し続けることは必須の努力である。施設の将来計画検討は、長期に亘る人材、技術、予算の投入とそれに必要な獲得のスキーム、方針を決定する基盤となるばかりではなく、その検討のプロセスにおいて施設に関わる国内外の状況を改めて確認し、施設自身の現状を見つめ直すことで、ひるがえっては施設の現在の健全で安定的な運用にも大いに資する。特に、物質・生命科学実験施設（MLF）の中性子実験装置に関しては、国外においては、大型施設に限っても、建設が進む欧州連合の European Spallation Source (ESS)、第 2 ターゲットステーション計画を進める米国 Oak Ridge National Laboratory の Spallation Neutron Source (SNS)、2 つのターゲットで順調に運用を続けながら第 1 ターゲットステーションの高度化を検討する英国 ISIS Neutron and Muon Source (ISIS)、昨年より稼働を開始した中国 China Spallation Neutron Source (CSNS)があり、ドイツの Jülich Center for Neutron Science が計画する High Brilliance Neutron Source 計画など野心的な中小規模の施設の計画も複数ある。そのような中では、現在世界一線級とされている MLF の評価を維持し続けるためだけでも次の高度化計画に対するたゆまぬ検討、研究とそのためのリソースの投入が必要となる。また、一方で、そのようなリソースを確保する戦略の一環として、J-PARC センターとしては日本学術会議のマスタープランの募集に対し、MLF の将来計画を継続的に提案してきた。次回 24 期の募集についても、2019 年秋の応募を目指し、J-PARC、MLF 内での検討を進める動きが 2017 年より始まっている。

MLF 内で立ち上がった MLF 将来計画技術検討会は、そのような動きに合わせたものであった。この検討会は、線源グループ、ミュオングループ、中性子グループの有志が合同で将来計画の、特に技術的な部分についてざくばらんな議論を重ねることでその検討を行っていくインフォーマルな勉強会であった。この検討会に当たって、中性子グループでは、私がこれまでの MLF シンポジウムや中性子科学会主催による検討会での中性子実験装置関係の報告をまとめた現状報告と 4 つの装置グループ、すなわち、結晶構造グループ（粉末回折装置、単結晶回折装置）、ナノ構造グループ（反射率計、小角広角散乱装置）、パルス中性子応用グループ（中性子断面積測定、PGA 装置、イメージング装置、基礎物理測定装置等）、分光グループ（チョッパー型分光器、逆転配置型分光器、スピネコー）による調査、検討の報告が行われた。

- 第1回目 2017年10月12日：これまでの確認（中島健次）
- 第2回目 2017年11月16日：結晶構造グループから（ステファヌス ハルヨ）
- 第3回目 2017年12月15日：ナノ構造グループから（山田悟史）
- 第4回目 2018年1月18日：パルス中性子応用グループから（及川健一）
- 第5回目 2018年2月1日：分光グループから（梶本亮一）

本報告書は、MLF 将来計画技術検討会において行われた中性子グループの発表資料をとりまとめたものである。この報告が、J-PARC、MLF の将来計画の検討や、さらには、日本中性子コミュニティにおける MLF のあり方についての検討の一助となることを望む。

2018年11月25日  
J-PARC センター  
物質・生命科学ディビジョン  
中性子利用セクション  
セクションリーダー 中島健次

## 1. これまでの検討について

中島健次

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

MLF 将来計画技術検討会において、各装置グループによる検討報告に先立ち、これまで MLF シンポジウムや中性子科学会が主催する将来計画検討会で私が述べた中性子実験装置の将来計画件等に関する意見をとりまとめた。

将来の中性子実験装置を考えるに当たっては1つジレンマがある。新たな技術によって実現される新たな測定の機会は、中性子実験のあり方まで変えるのでサイエンス側からはアイデアを出しづらい。一方で、技術側からは、何が新しいサイエンスにつながるか見えづらいので、技術開発の方向性を定めづらい。さらには、J-PARC や SNS、ISIS の第2ターゲットステーションの登場時に爆発的に現れた多くの新しい技術、それによって実現された新しい測定の機会について、現状、中性子コミュニティはそれを飲み込み、自分のものにしようとしている段階で、次の新しい機会というものについてなかなか考えるゆとりがないところもある。その中で、私はこれまでに以下の3つの点を紹介することで、将来計画の検討の一助となればと考えてきた。1つは、現状の確認である。すなわち、今世紀初頭に現れ、今、現在我々が利用しつつある新たな測定の機会についてのいくつかの例を紹介してきた。次に、過去の検討例の紹介である。これまで、MLF 内でもいくつかの将来計画の検討が行われてきた。1つは2010年に報告書がとりまとめられた J-PARC 物質・生命科学実験施設将来計画検討タスクの活動であり、もう1つは、Neutron Advisory Committee 2015 時に行われた将来計画検討とりまとめである。さらに、3つ目は、海外の将来計画の状況を確認することである。

将来の中性子実験装置のあるべき姿を見定めるには、線源、装置グループ、ユーザーの三者の濃厚なやりとりが欠かせない。「Science driven technology & Technology driven science」の精神である。そのためには、中性子の技術と、そして、中性子が担うサイエンスについての将来に渡る戦略が重要であろう。

J-PARC MLF 将来計画技術検討会  
2017年10月12日

## 第2ターゲットステーションの 中性子実験装置

J-PARCセンター  
MLFディビジョン  
中島健次他



## 将来の中性子実験装置

### ジレンマ

- 新たな機会は、中性子実験のあり方まで変えるのでサイエンス側からはアイデアを出しづらい
- 技術側からは、何が新しいサイエンスに繋がるか分かりづらいので、方向性を定めづらい
- 現状の確認する
- 過去の検討を振り替える
- 海外等の動向を参考にする

# 最新中性子実験施設における革新

最先端核破砕中性子源は世界に広がる

**ISIS (UK)**

2008より加速器のアップグレード、TS2稼働開始

**SNS (US)**

2006より稼働、最高出力1.4MWを記録

**ESS (EU)**

2019より稼働予定、5MWを計画

**CSNS (China)**

2018より稼働。0.1MWから将来0.5MWを計画

**MLF/J-PARC (Japan)**

2008より稼働。1MWを計画

## なにが変わったか？

大強度  
×  
技術革新  
||

研究における新たな常識

## 新しく行われるようになった測定の例

■ **例1: より小さな試料による中性子実験**

- 試料や測定の内容にもよるが、回折実験では1-2 mgでの測定も常識となっている。
- J-PARC、SNSでは、低次元系など系を選べば数100 mg以下の単結晶試料での中性子非弾性散乱測定で成果(論文)が生み出されている。

■ **例2: 時分割測定、ストロボスコピック測定**

- 電池材料の充放電過程、鉄鋼材料で圧延プロセスをシミュレートした熱加工過程での実時間測定が行われるようになった。
- 周期的に繰り返す状況(外場の変化、モーターの回転)を継続的に測定して得られたデータを再構成することで、パルス繰り返し周期に近い、あるいは、それより短い短時間の変化も測定できるようになった。

■ **パルス重畳化技術の実用化**

- パルス重畳化技術が実用化され、チョッパー型分光器での多重 $E_i$ 測定が普遍化し、白色中性子を利用する装置でのパルス整形も可能となった。
- 多重 $E_i$ 測定は、測定の冗長性を増し、異なるダイナミックレンジ(時間スケール)の同時測定を可能にし、非弾性散乱の生産性を大きく引き上げた。

■ **新しい解析技術の登場**

- 新たに登場した測定の機会は、新しい解析方法を生み出すことへの刺激となった。例えば、より広いダイナミックレンジのデータが取れる多重 $E_i$ 測定は、モデルフリーで準弾性散乱データを解析するMode Distribution Analysis、実時間、実空間の情報を抽出する $G(r,t)$ 解析を生み出すモチベーションとなった。

# J-PARC MLF 将来計画検討タスク

J-PARC 10-02

**J-PARC 物質・生命科学実験施設  
将来計画検討タスク 報告書**



2010年11月  
J-PARCセンター 物質・生命科学ディビジョン

**線源:**  
25Hz (1MW) → 20Hz (1MW) + 10Hz (0.5MW)  
30Hz、1.5MWに増強したパルスを2つに分ける

**その時の装置:**

- ・パルスを分け合って・・・
- ・低い周波数でも性能が落ちない、あるいは上がる装置を第2TSに移す
- ・残った装置は元のステーションを最適化してロスしたパルス分を取り返す

あくまでもステーションを可能な技術で2つに分けた際にどうするかという技術的な要請に答えただけの考えに見える・・・  
(ならば、同じステーションを2つ作ってポートを増やしハイローミックスするという方向、高周波数ターゲットを作るという方向等々も・・・)

# J-PARC MLF 将来計画検討タスク

## ■ 繰り返し周期を変えるメリット

- ・ 周波数を落とす (主に回折、冷中性子以下の非弾性) → あんまり劇的によくなる

表 4.1.1 MLF の TS2 (10Hz、0.5MW) と TS1 (25Hz、1MW) での  
中性子実験装置の性能比較

| BL        | 飛行距離 (m)<br>L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> , A | 1 フレーム波長幅 (Å)<br>(25Hz 時), B | 実用利用の波長幅 (Å)<br>(25Hz 時), C | 必要フレーム周波数 (Hz), D | 実際の運転用周波数 (Hz) | 1 フレーム波長幅 (Å)<br>(10Hz 時) | 理想的波長範囲 (Å) (10Hz 時), E | 0.5MW ピーク強度 (1MW 比), F | 実効強度比 (10Hz・0.5MW / 25Hz・1MW) |
|-----------|--|------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| BL01 四季   | 20.5   | 7.7                          | 5                           | 39                | 25             | 19.3                      | 0.3~9                   | 0.5                    | 0.9                           |
| BL03 iBIX | 40   | 4.0                          | 3.2                         | 31                | 25             | 9.9                       | 0.7~10                  | 0.5                    | 1.6                           |

BL08: 25Hz時の波長幅 1.6Å 実際に必要な波長幅5Å 運転周波数 25/3=8.3Hz  
10Hz時の波長幅4Å これでは足りないのので5Hzにして8Åまで使用する  
1st Target(25Hz)では、1MW/3=0.33MWで利用していた  
2nd Target(10Hz)では、0.5MW/2=0.25MWで運転する  
0.25/0.33=1/1.2=0.83

|               |    |     |     |    |    |      |       |     |     |
|---------------|----|-----|-----|----|----|------|-------|-----|-----|
| ARISA-II      | 18 | 8.8 | 8   | 28 | 25 | 22   | 22.25 | 0.5 | 1.4 |
| BL19 匠        | 42 | 3.8 | 3.8 | 25 | 25 | 9.4  | 7     | 0.5 | 0.9 |
| BL20 iMATERIA | 31 | 5.1 | 5   | 26 | 25 | 12.8 | 13    | 0.5 | 1.3 |
| BL21 NOVA     | 20 | 7.9 | 8   | 25 | 25 | 19.8 | 12    | 0.5 | 0.8 |

3.956\*1000/A/25      B/C\*25      ただし、8.3=25/3      B\*25/10      E/C\*F

※必要フレーム周波数は、25Hz より少ない場合はその値を、25Hz を超えた場合は 25Hz を利用

J-PARC MLF 将来計画検討タスク報告書より

# 25Hz-1MW vs 10Hz-0.5MW

## ■ 結晶構造グループ編

| Neutron Instrument   | Operation                   |
|--|-----------------------------|
| <b>SuperHRPD – BL08</b><br>Super High Resolution Powder Diffractometer   | 25/5 Hz (100%)              |
| <b>SPICA – BL09</b><br>Special Environment Powder Diffractometer         | 25/3 Hz (100%)              |
| <b>iMATERIA – BL20</b><br>Multipurpose Powder Diffractometer             | 25 Hz (50%); 12.5 Hz (50%)  |
| <b>PLANET – BL11</b><br>High Pressure Powder Diffractometer              | 25 Hz (70 %); 12.5 Hz (30%) |
| <b>TAKUMI – BL19</b><br>Engineering Materials Diffractometer             | 25 Hz (95%); 12.5 Hz (5 %)  |
| <b>iBIX – BL03</b><br>Biological Single Crystal Diffractometer           | 25 Hz (100%)                |
| <b>SENJU – BL18</b><br>Extreme Environment Single Crystal Diffractometer | 25 Hz (100 %)               |

参考: 現在の結晶G装置と使用フレーム数 (S.Harjo)  
\* この他、反射率計も時々ダブルフレームを使用する

# 25Hz-1MW vs 10Hz-0.5MW

## ■ 結晶構造グループ編

| Neutron Instrument   | Operation      |
|--|----------------|
| <b>SuperHRPD – BL08</b><br>Super High Resolution Powder Diffractometer | 25/5 Hz (100%) |
| <b>SPICA – BL09</b><br>Special Environment Powder Diffractometer       | 25/3 Hz (100%) |

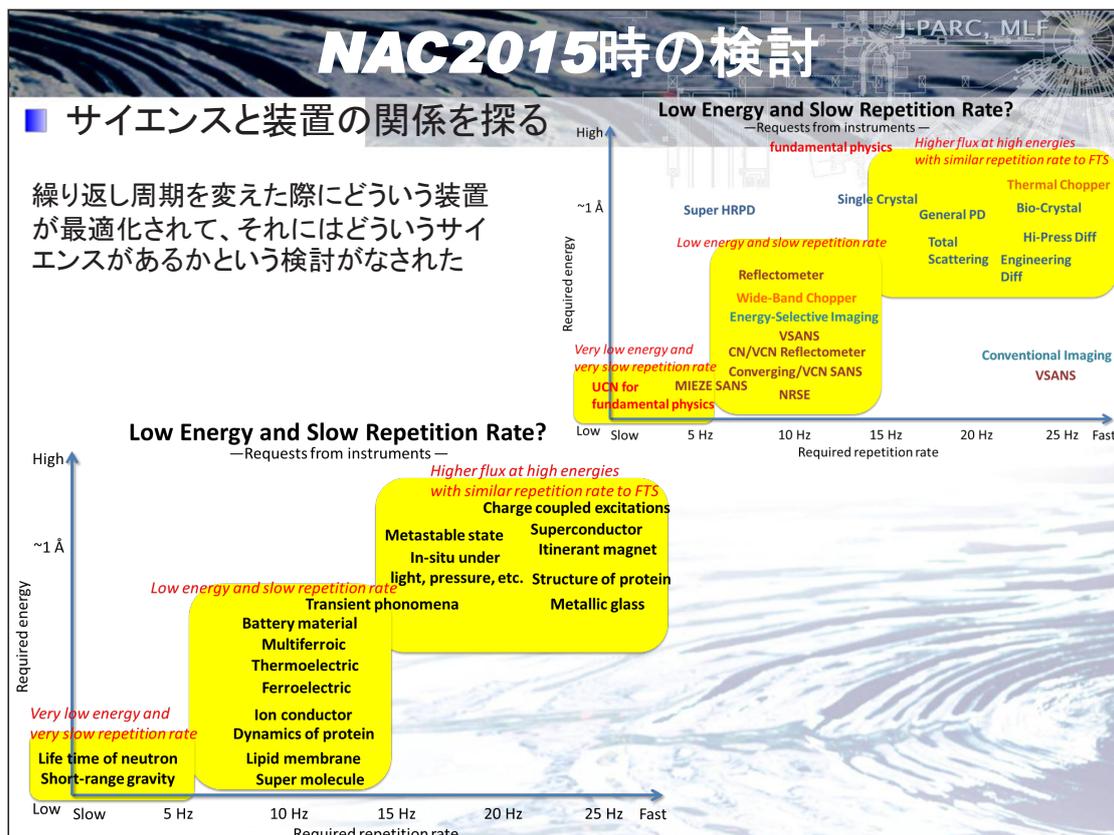
BL08: 25Hz時に1/5にして使用している  $1\text{MW}/5=0.2\text{MW}$   
10Hz時には、1/2にして使用できる  $0.5\text{MW}/2=0.25\text{MW}$

**1.25倍!!!**

もし、5Hz-0.5MWなら、2.5倍です.....

|  |               |
|--|---------------|
| Engineering Materials Diffractometer                                     | (5 %)         |
| <b>iBIX – BL03</b><br>Biological Single Crystal Diffractometer           | 25 Hz (100%)  |
| <b>SENJU – BL18</b><br>Extreme Environment Single Crystal Diffractometer | 25 Hz (100 %) |

参考: 現在の結晶G装置と使用フレーム数 (S.Harjo)  
\* この他、反射率計も時々ダブルフレームを使用する



# NAC2015時の検討

J-PARC, MLF

## J-PARCの装置グループへのアンケート

### Intensity

- **Most instruments need beam-power** as high as possible
- If SANS instruments will be build at STS, 0.5 MW may be enough
- Higher flux at cold neutron region (improvement on FTS): imaging, X-tal, SANS
- **Higher flux at high energy (~100meV):** X-tal, thermal chopper, general powder

### Pulse shape

- Most instruments prefer profile shape like the present decoupled moderator in FTS<sup>※</sup>
- Need **peak as high as possible**, but the tail is preferred to disappear after several hundred micro seconds: wide band chopper
- Operation using **double or single bunch-mode** can be changed easily to use epithermal neutron

### Other requirements

- The shape and size of the moderator should be optimized: **higher flux** and well focused beam
- **Background produced by the TMR system** (especially at high energies) should be seriously considered: inelastic instruments
- **Ortho-hydrogen moderator for polarized neutrons**

## 海外の新たな計画

| <b>SNS STS</b>  |                             | <b>ESS</b>   | <b>ISIS TS1</b>   |
|---|-----------------------------|--|---|
| FTS   | STS                         | ESS  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 大胆なTS1のアップグレードも検討</li> <li>➢ 線源の抜本的な改造</li> <li>➢ 2倍の中性子束</li> <li>➢ 既存装置のジオメトリーを確保</li> <li>➢ 新規装置も2台程度検討</li> <li>➢ 2020年頃を目指している</li> </ul> |
| 2006~   | ????~                       | 2019~  |   |
| 60Hz->50Hz  | 10Hz                        | 14Hz   |   |
| 1.4MW->2MW  | 0.47kW                      | 5MW  |   |
| 24 ports  | 22 ports                    | Long Pulse (2.86ms)  |   |
| Water(P),   | liq. H <sub>2</sub> (D, 2C) | Rotating W Target  |   |
| liq. H <sub>2</sub> (2C, P)   |                             | liq. H <sub>2</sub>  |   |
|   |                             | 40 ports   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 繰り返し周期を落として、冷中性子の利用、低周波数に有利な装置の利用を行う戦略</li> <li>➢ 広いバンド幅が必要な測定(回折計)</li> <li>➢ 冷中性子非弾性</li> <li>➢ ナノスケールの構造</li> <li>➢ 長波長に相性の良い光学素子について、それを有効利用する装置</li> <li>◆ ORNLは、原子炉(HFIR)、パルス(SNS)だけでなく、それに大型計算機(CSMD)を組み合わせて全体の成果最大化を目指している。</li> </ul> |                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 平均強度でILLと同等</li> <li>◆ Long pulseを用いていて、パルス整形技術が必須→RRM、WLFMなどが前提</li> <li>◆ ビーム輸送技術が重要</li> <li>➢ Bispectral</li> <li>➢ Double-blind chopper</li> <li>➢ CAMEA System</li> <li>➢ Fan-chopper</li> <li>➢ Multi-Grid Detector</li> <li>➢ Talbot, SE-M imaging</li> </ul> |   |

## まとめ

- ・線源、装置グループ、ユーザー、3者の濃密なやりとりが必要

**Science driven technology**

**Technology driven science**

- ・第1がよすぎるために、第2は悩ましい
  - ・低周期ターゲットは自明ではない
  - ・もっと大強度、もっとビームポート
- ・第1の検討も含まれるべき
- ・サイエンスの戦略は？

## 2. 結晶構造グループ

ステファヌス ハルヨ

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

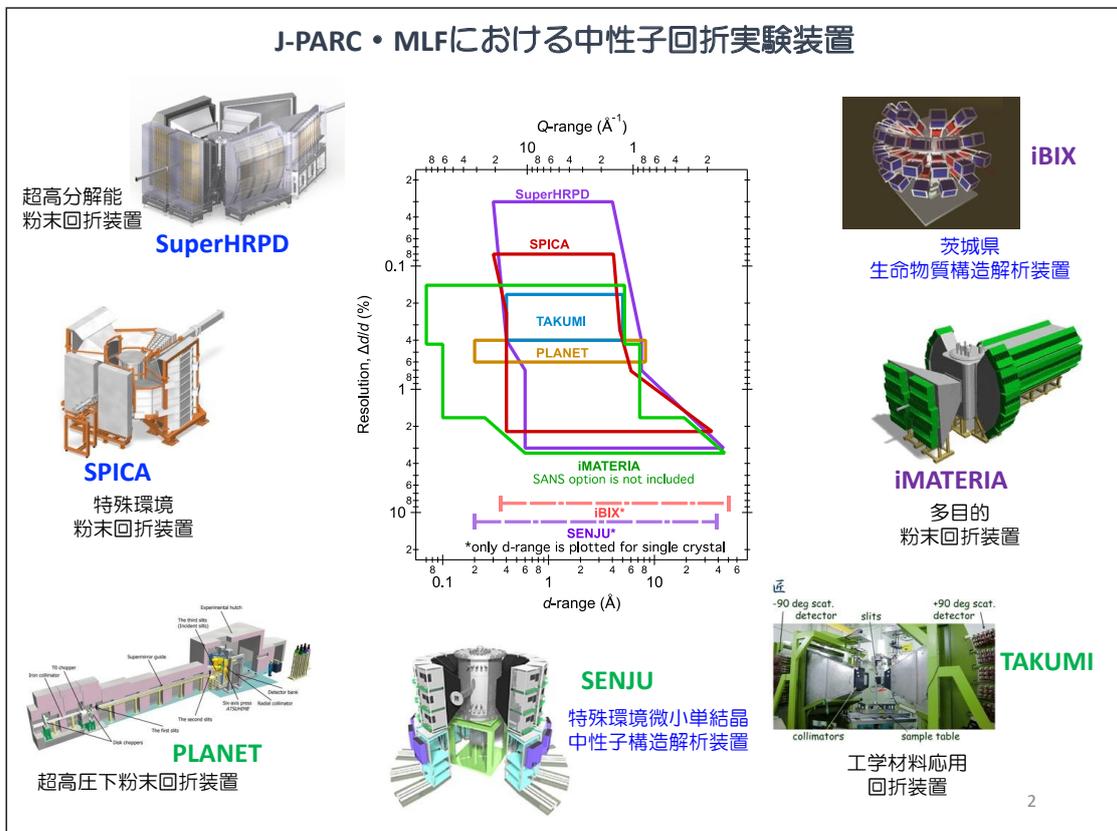
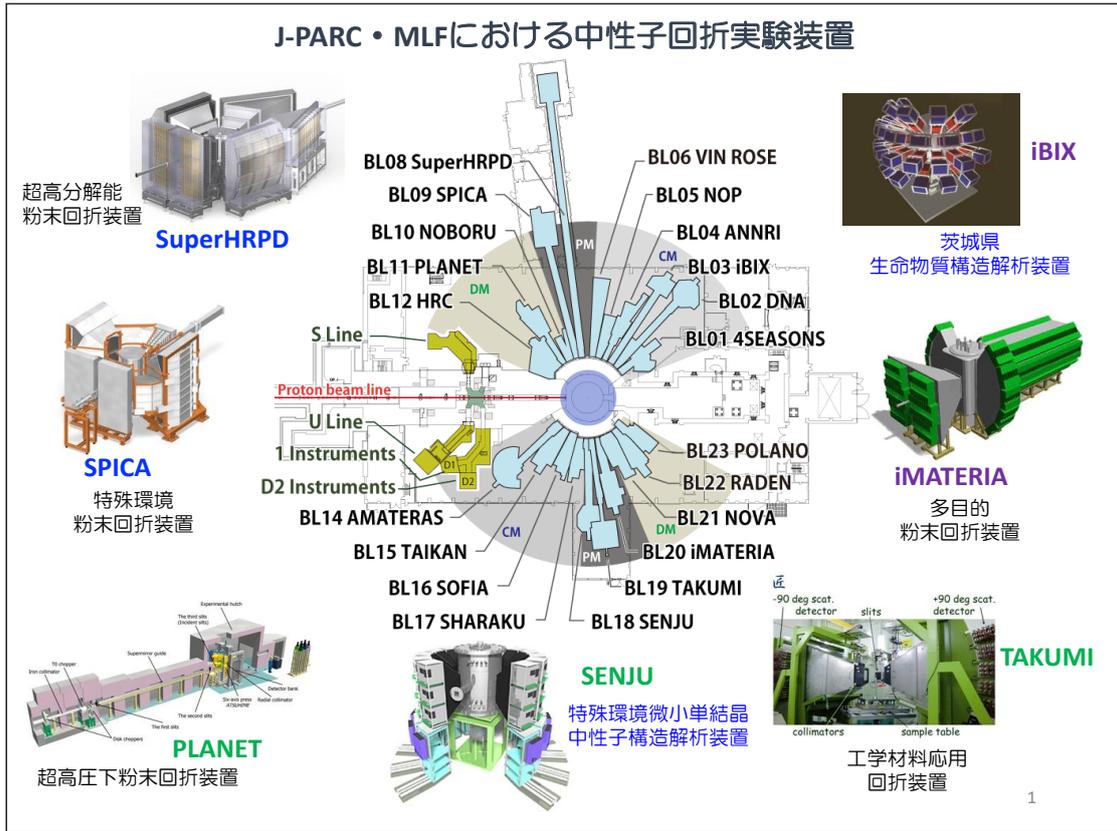
結晶構造グループは、超高分解能粉末回折装置 (BL08 SuperHRPD)、特殊環境粉末回折装置 (BL09 SPICA)、茨城県材料構造解析装置 (BL20 iMATERIA)、超高压下粉末回折装置 (BL11 PLANET)、工学材料回折装置 (BL19 匠)、特殊環境微小単結晶中性子構造解析装置 (BL18 千手)、茨城県生命物質構造解析装置 (BL03 iBIX) から構成される。これらの実験装置は、それぞれの目的のために世界最高水準の性能を持っているだけでなく最適な性能で設計されている。

- BL08 SuperHRPD；最新材料開発技術により生み出される複雑な構造、複合材料、階層構造を高精度で解析するための実験装置。本装置は粉末回折装置の中で世界最高分解能を持っており、25/5 Hz で運転している。
- BL09 SPICA；機能性材料の静的構造および実用デバイスの operando 測定による非平衡状態の構造のリアルタイム観測を行う実験装置。高い分解能と高強度の良いバランスを持った装置であり、25/3 Hz で運転している。
- BL20 iMATERIA；広 d (格子長) 領域・高効率・高分解能での結晶構造や原子配列の精密観測のための実験装置。25 Hz および 25/2 Hz での運転はそれぞれ 50% である。
- BL11 PLANET；高压地球科学、高压物理、材料科学をカバーする実験装置。25 Hz および 25/2 Hz での運転はそれぞれ 70% および 30% である。
- BL19 匠；材料の内部応力・相比・転位・集合組織など、新材料の設計や構造物の信頼性評価に役立つ様々な情報を得る実験装置。25 Hz および 25/2 Hz での運転はそれぞれ 95% および 5% である。
- BL18 千手；温度、磁場、圧力、電場、光 (レーザー) 照射等の多重極限環境下での構造解析および局所構造解析を微小 (0.5 mm 角以下) 単結晶に対して行う実験装置であり、主に 25 Hz で運転している。
- BL03 iBIX；主として、タンパク質分子内の水素や水和構造を観測し、タンパク質の分子認識と基礎的な酵素反応機構を解明する実験装置であり、主に 25 Hz で運転している。

第 2 ターゲットステーションでの結晶構造グループの装置検討を行ったときにターゲット性能はまだ決まっていなかったため、検討された最新のターゲッ

ト性能を考慮していなかった。しかし、中性子による結晶構造解析がカバーするサイエンスを考えると、現在 MLF で稼働している装置群は分解能および Q レンジにおいては最適な装置群である。また、現在およびこの先 10 年後のサイエンス、例えば、電池材料、熱電材料、強誘電体、超電導材料、光、圧力、電場等下でのその場測定によるサイエンスおよび材料開発、準安定状態の材料、金属ガラス、構造タンパク質等の研究は、20 Hz から 25 Hz の周期、1 Å 付近の波長レンジのショートパルスを用いた装置での実施が最適である。現在 ESS で建設中の結晶構造解析の実験装置は、MLF で行われているサイエンスとほぼ変わらないサイエンスを背景にして設計されており、チョッパーおよびその運転方法の工夫で MLF の装置群とほぼ同じ装置分解能および波長レンジになるように目指している。以上のことを考えると、結晶構造解析の実験装置群のほとんどは、10 Hz の第 2 ターゲットステーションを仮定した場合、一部の装置を除いて（例えば現在すでに 25/5 Hz で運転している装置）、現在の装置性能を大きく上回るメリットは考えにくい。

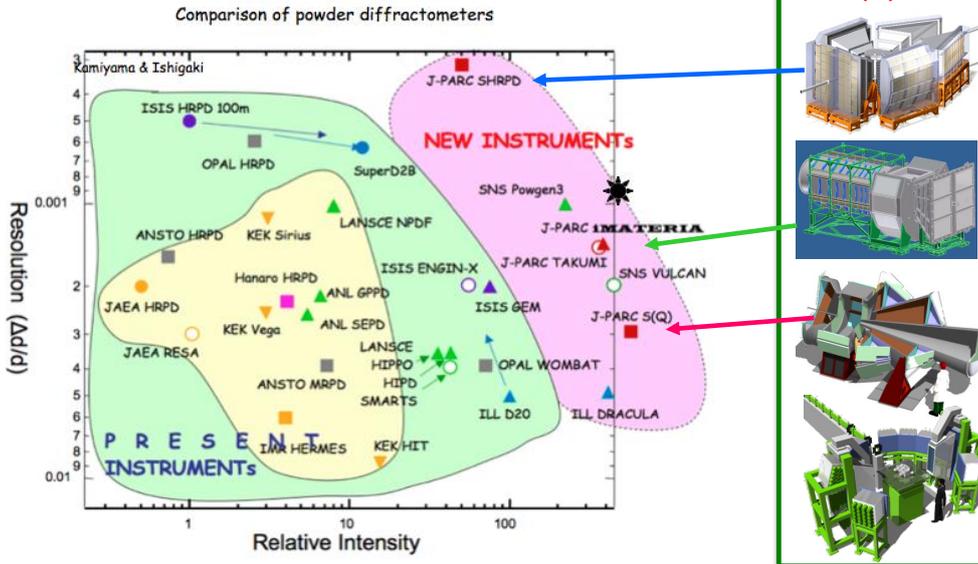
一方、日本で小型パルス中性子源施設の立ち上げが多く進められている。その小型パルス中性子源施設の設計および建設について専門家が多くいるが、それを研究に応用するための専門家は残念ながら少なく、MLF のような大型施設にほとんど集中している。このような小型パルス中性子源施設が MLF の将来計画になるかどうかについて別検討を必要とするが、大型および小型のパルス中性子源間のそれぞれの持ち味を活かせる成果・効果を生み出すために連携を構築する必要はある。



## Diffractometers

### Resolution & Intensity

Diffractometers in the World



### BL08 SuperHRPD

#### <サイエンス>

最新材料開発技術により生み出される複雑な構造、複合材料、階層構造を高精度で解析する。

(例) 誘電体、磁性体、マルチフェロイック、MOF、電池材料、熱電材料、etc...

#### <装置性能>

優：超高分解能 ( $\Delta d/d \sim 0.03\%$ )、低バックグラウンド

不足：低強度(100m、5Hz運転)、試料環境の種類

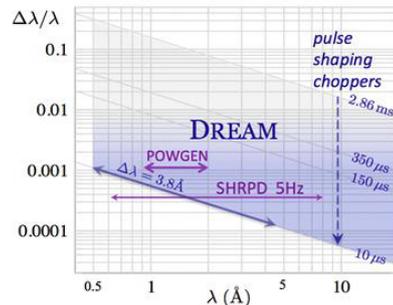
#### <他施設との比較>

- HRPD(ISIS)  $\Delta d/d \sim 0.04\%$
- WISH(ISIS)  $\Delta d/d$  選択可能(数値明記無し)
- POWGEN3(SNS)  $\Delta d/d \sim 0.1\%$ (選択可能)
- DREAM(ESS)  $\Delta d/d$  選択可能 (右下図参照)

現在の流行りはフレキシブルな分解能?

#### <今後の装置及びさらなる要望>

- 試料周辺環境の充実
- 14Tマグネットを使ったサイエンスの展開
- 純粋な結晶構造解析分野の開拓



Flexibility and range of wavelength resolution  $\lambda/\lambda$  versus  $\lambda$  due to pulse shaping from full pulse width 2.86 ms to high resolution 10  $\mu$ s.

## BL09 SPICA

MLFの中での立ち位置：粉末回折装置

**高分解能**  $\Delta d/d = 0.08$  SHRPD と iMATERIA の中間  
**大強度** iMATERIA と同等



広い  $d$  領域を一度に観測 iMATERIA と同等

試料環境の自由度 **大きさ** TAKUMI の次ぐらいに自由度がある  
**環境** 大気でも真空でもどちらにも対応 (only one)

競争相手 SNS POWGEN, ANSTO WOMBAT, ISIS WISH, ISIS GEM, ISIS Polaris

海外からも、電池研究専用と知られているが、固体化学、磁性、集合組織等の広い分野で利用可能 (試料周辺環境次第)

### 第2ターゲットステーションに期待するもの

実験スペース 試料環境スペースや準備スペース等を大きく取る

案1) ポート数を減らしてでも、装置間隔を広げる。

案2) 共通スペースをMLFよりも多くとる。

### 第2ターゲットステーション or 第1ターゲットのアップグレードでの期待 少量試料専用の装置

100mg 以下の試料量 で 30分未満の測定

10x10mm以下のビームサイズに集光

高速な外場変化 (温度・圧力・電場・磁場ジャンプ) と物性と構造の関係

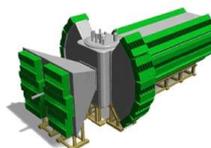
## BL20 iMATERIA

### <サイエンス>

広  $d$  (格子長) 領域・高効率・高分解能での結晶構造や原子配列の精密観測

(例) リチウム電池・燃料電池等エネルギー関連材料等の結晶構造や原子配列の解明、etc...

最近では集合組織測定、金属材料の加熱・変形中のその場測定にもカバーを広げている



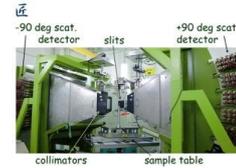
粉末構造解析、PDF解析、小角散乱

競争相手：SNS POWGEN, ANSTO WOMBAT, ISIS WISH, ISIS GEM, ISIS Polaris, LANSCE HIPPO

## BL19 TAKUMI

### <サイエンス>

材料の内部応力・相比・転位・集合組織など、新材料の設計や構造物の信頼性評価に役立つ様々な情報を得る



### <装置性能>

優：分解能 $\Delta d/d$ が高い 0.2%~0.4%

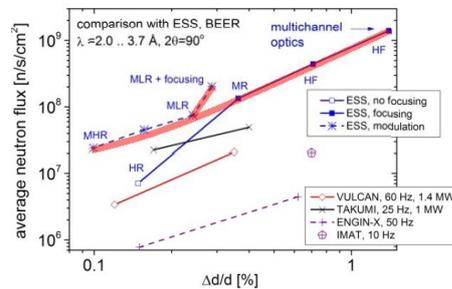
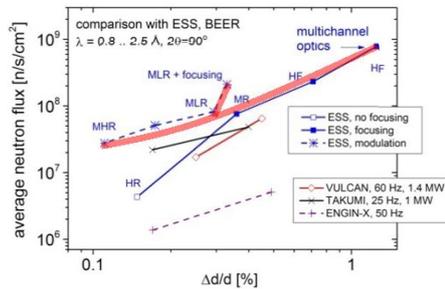
アクセサリ類（SE機器）の豊富さ、データ処理ソフト（GUIからの時分割処理が好評）

光学系、ラジアルコリメータ（S/Nが良い、余計な散乱が入らない）

不足：強度（マッピング測定の測定時間短縮、その場測定の時間分解能向上、1MWになれば十分かも）

位置分解能（マッピング測定、1mm以下を望む声が多い）

### <他装置との比較>



## BL19 TAKUMI の続き

### <他装置との比較> の続き

- SNS VULCAN : SANSオプション（動かない）
- ESS BEER : SANS + イメージングのオプション（??）、低角バンク、アーク検出器



### <今後の装置及びさらなる要望>

- 1mm以下の分解能でのマッピング
- 1秒以下での時分割測定
- 膜状等の微小体積試料の測定
- 単結晶試料の応力関連研究 → 2次元検出器を全バンクに用いる
- 金属ガラスをカバーする → ストレートガイド管



BL03 iBIX の続き **海外施設との比較**

| 世界の回折計の状況および目標性能          |                                  |      |                           |                    |                     | 最高測定実績                      |                             |                |
|---------------------------|----------------------------------|------|---------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 装置名<br>中性子源               | 研究機関                             | 中性子源 | タイプ                       | 状態<br>完成年          | 検出器<br>タイプ          | 最大格子長<br>(Å)                | 最大格子体積<br>(Å <sup>3</sup> ) | 分解能<br>(Å)     |
|                           |                                  |      |                           |                    |                     | 格子長<br>(Å)                  | 格子体積<br>(Å <sup>3</sup> )   | 最高分解能<br>(Å)   |
| iBIX<br>MLF               | J-PARC (日)                       | パルス  | TOF<br>150kW<br>(1MW予定)   | 稼働中<br>2008年       | WLSFシン<br>チレータ      | 133x133x133<br>(46x 59x 23) | 2,352,637<br>(62,422)       | (2.00)<br>1.10 |
| MaNDi<br>SNS              | オークリッジ国立<br>研究所ORNL<br>(米)       | パルス  | TOF<br>1.2MW<br>(1.4MW予定) | 稼働中<br>2006年       | アンガー                | 73x 73x 99<br>(73x 73x 99)  | 461,072<br>(457,716)        | (2.10)<br>1.70 |
| PCS<br>LANSCE             | ロスアラモス国立<br>研究所ORNL<br>(米)       | パルス  | TOF<br>56kW               | 停止中<br>1983年       | <sup>3</sup> He     | 95x 96x104<br>(23x 19x 41)  | 983,677<br>(17,617)         | (2.20)<br>1.10 |
| IMAGINE<br>HFIR           | オークリッジ国立<br>研究所ORNL<br>(米)       | 原子炉  | Quasi-Laue<br>85MW        | 稼働中<br>1990年<br>改造 | IP                  | 40x 40x161<br>(34x 35x 44)  | 223,689<br>(51,020)         | (1.91)<br>1.75 |
| BIODIFF<br>FRM-II         | ハインツ・マイ<br>アー・ライブニッ<br>ツセンター (独) | 原子炉  | 単色<br>20MW                | 稼働中<br>2004年       | IP                  | 112x112x 73<br>(73x 50x 45) | 912,087<br>(164,073)        | (2.40)<br>1.61 |
| LADI-I,III<br>/D19<br>HFR | ラウエ・ランジュ<br>バン研究所ILL<br>(仏)      | 原子炉  | Quasi-Laue/単<br>色<br>58MW | 稼働中<br>1993年<br>改造 | IP/ <sup>3</sup> He | 106x 96x114<br>(34x 35x 44) | 1,141,055<br>(53,386)       | (2.50)<br>1.05 |
| BIX-3,4<br>JRR-3          | 日本原子力研究開<br>発機構JAEA (日)          | 原子炉  | 単色<br>20MW                | 停止中<br>1990年<br>改造 | IP                  | 76x 85x123<br>(67x 67x 41)  | 790,842<br>(160,526)        | (2.15)<br>1.50 |

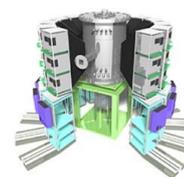
格子長：圧倒的に優れている、分解能：高分解能な他の装置（PCS, LADI）と同程度  
 ESSでは類似装置；NMXが計画されている。iBIX, MaNDiの対象としている格子体  
 積より大きなタンパク質を対象（～200Å）として設計が進められている。

**J-PARC出力1MW時に世界最高性能を達成**

**BL18 SENJU**

＜サイエンス＞

1. 単位格子50Å以下の低分子有機化合物や磁性物質の微小（0.5 mm 角以下）単結晶を用いた結晶及び磁気構造解析
2. 温度、磁場、圧力、電場、光（レーザー）照射等の多重極限環  
境下での構造解析及び局所構造解析



＜装置性能＞

優：大面積の検出器と低いバックグラウンドにより、**0.1mm<sup>3</sup>以下の微小単結晶の回折測定を現実的なビームタイム(最大1週間程度)で実現。**

物性物理、有機結晶、機能性材料、地球科学など幅広いサイエンスの領域をカバー。

不足：海外の物性物理専用の装置（WISH、CORELLI）に比べると長波長領域の集光が小さい。

試料位置の下に検出器が1台しかないため、この方向でスキャンできる逆空間が限られる。

※ただし、これらは低バックグラウンドや多様な試料環境実現とトレードオフの関係にある。

**BL18 SENJU** の続き

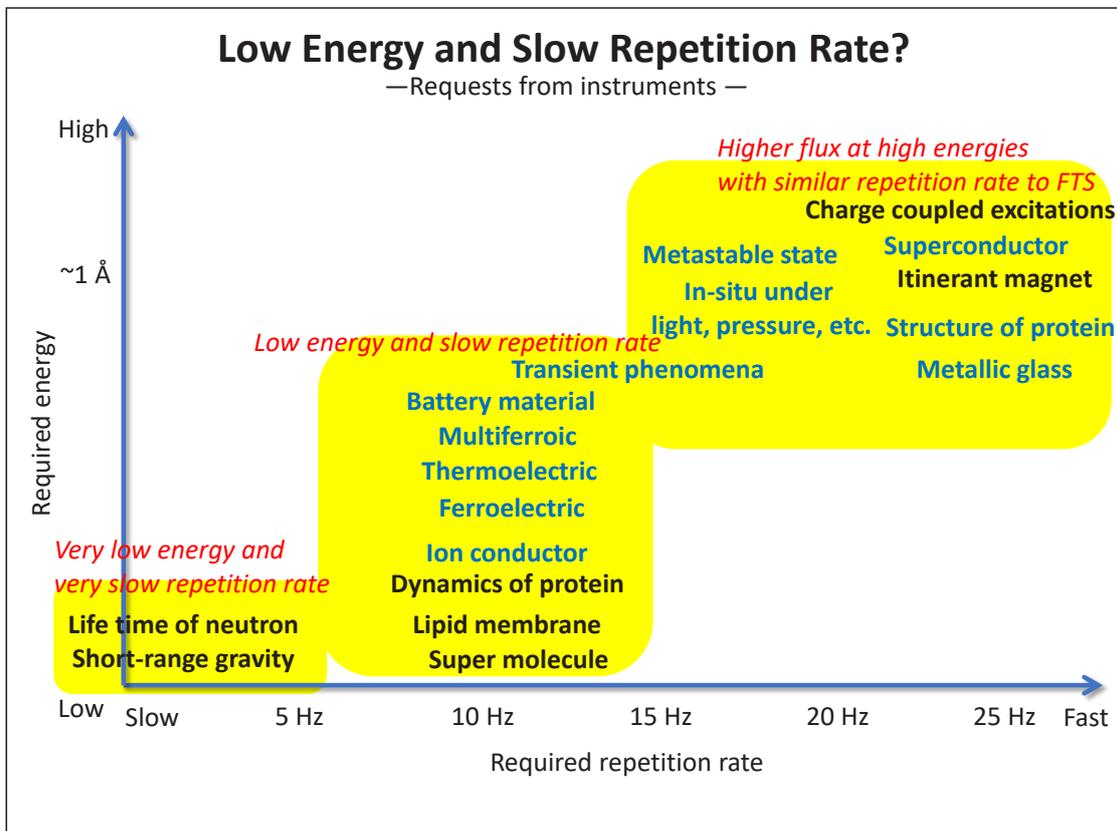
＜他装置との比較＞

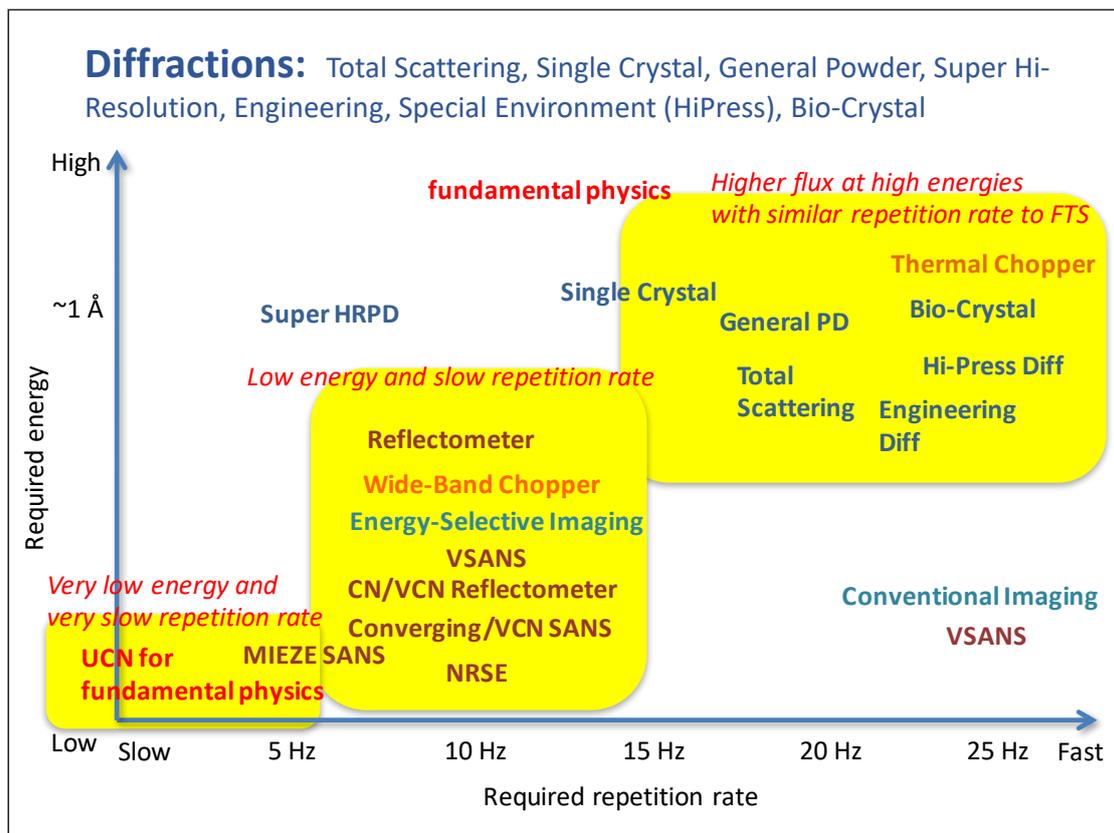
| 世界の主なTOF単結晶中性子回折計の状況 |           |                  |           |                       |           |
|----------------------|-----------|------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| 装置名                  | 施設        | 主な用途             | 主な試料環境    | 試料サイズ                 | 最大格子長 (Å) |
| SENJU                | J-PARC(日) | 構造解析(物理、化学)、物性物理 | 真空試料槽+冷凍機 | < 0.1mm <sup>3</sup>  | 50        |
| TOPAZ                | SNS(米)    | 構造解析(物理、化学)      | 吹付け型冷凍機   | < 0.1 mm <sup>3</sup> | 50        |
| CORELLI              | SNS(米)    | 物性物理             | 真空試料槽+冷凍機 | < 1.0 mm <sup>3</sup> | N/A       |
| SXD                  | ISIS(英)   | 構造解析(物理、化学)、物性物理 | 真空試料槽+冷凍機 | 2.0 mm <sup>3</sup>   | ~20       |

- 物理、化学分野の結晶構造解析から磁気構造解析といった物性物理分野まで幅広い領域をカバーする、汎用性の高い回折計。
- 同種の装置はISISのSXDだが、試料サイズの点で勝る。

＜今後の装置及びさらなる要望＞

- より極端な試料環境(磁場：>10T、温度：~2000°C、圧力：5~10 GPa)の実現
- 広い逆空間を効率的にスキャンするための、短波長領域の中性子強度増加
- 磁気反射の測定に特化した装置の検討





大強度施設 vs. 小型・中型施設

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・短時間測定</li> <li>・時分割測定</li> <li>・試料周辺環境装置充実</li> <li>・競争率が高い</li> <li>・敷居が高い</li> <li>・失敗は許さない</li> <li>・応用の専門家が多くいる</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・測定時間が長い</li> <li>・時分割測定は現象に限られる</li> <li>・簡易な料周辺環境装置</li> <li>・気軽に使える</li> <li>・トライ・エラーは可</li> <li>・応用の専門家が少ない</li> </ul> |
|--|---|

### 3. ナノ構造グループ

山田悟史<sup>1,2</sup>、青木裕之<sup>1</sup>

<sup>1</sup>J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

<sup>2</sup>高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

ナノ構造グループは、中性子全散乱測定装置 (BL21 NOVA)、小角・広角散乱測定装置 (BL15 大観)、反射率測定装置 (BL16 SOFIA、BL17 写楽) から構成される。

10 Hz、500 kW ショートパルスの仕様を仮定した場合、いずれの装置においても TS1 を大きく上回るメリットは考えにくい。一方、反射率測定においては波長幅の拡大によって測定時における角度走査を少なくすることが可能であるが、そのメリットを享受できる実験は限定的である。

第3回MLF将来計画技術検討会資料  
(中性子利用ナノグループ)

KEK 山田悟史

TS2とナノ構造観察装置群の相性

## アンケート内容

- ▶ 10 Hz, 500 kW, ショートパルスを仮定した検討をお願いします。
  - ▶ 1パルス当たりの強度は1MW, 25Hzと比較して1.25倍
  - ▶ とりあえずモデレーターの性能は同じとする
  
- ▶ 逆にこういった仕様であればメリットが大きいという提案があればお願いします。



## 反射率計の場合(10 Hz, 500 kW)

- ▶ バンド幅が広がるのでスキャンする角度が減らせる。
  - ▶ パルス中性子を用いた中性子反射率計は入射角( $\theta$ )を固定して波長( $\lambda$ )依存性を測定し、ある幅の  $Q_z = 4\pi \sin \theta$   $\lambda$  を走査。統計がたまったら次の角度に移る、という測定を繰り返す。
  - ▶ ただし、偏極反射率計の場合、バンド幅は偏極ミラーの臨界角で制限されるので恩恵は小さいかも。
- ▶ 一方、ビーム強度は半分になるので多分トータルの測定時間は伸びる。
  - ▶ ある入射角での測定は、マクセルピーク(波長約0.25 nm)における統計がたまるまで測定を行う。
  - ▶ 長波長から統計がたまっていくので、長波長の強度が増えてもあまり恩恵はない。
- ▶ 設計が1からやり直せるので、もう少し良い装置はできると思う。
  - ▶ ただし、予算規模に見合ったゲインであるかは激しく疑問。



## 反射率計の場合(仕様提案)

---

- ▶ ESSのようなロングパルスは小角散乱、反射率、スピネコーは許容可能（逆に言うと、ショートパルスは波長分解能がオーバースペック）。
    - ▶ つまり、ESS 5MWに強度の面では「絶対に」かなわないと考える。
  - ▶ 一方、MLFの中性子源はかなりの最適化が進んでいて、ショートパルスでこれ以上production rateを上げるのは難しそうに見える。
    - ▶ なので、現行案にはメリットはないように見える。
  - ▶ なお、強度[n/cm<sup>2</sup>/s]ではなく輝度[n/cm<sup>2</sup>/sr/s]が高ければ、集光ミラーによる恩恵が出てくる。
    - ▶ これもESSと同じ思想。
- 

## 小角散乱装置の場合

---

- ▶ 回答無し。
    - ▶ 反射率計と同じような感じ？
-

## 全散乱装置の場合

---

- ▶ 10 Hz, 500 kW
  - ▶ BL21に関しては、前回の報告書にあるとおり10Hzにするメリットはあまりないと考えている。
  
- ▶ 仕様提案
  - ▶ 熱中性子のフラックスをあげる工夫を行い、「d-rangeは狭いけれど高強度な粉末回折」が有効かもしれない。
  - ▶ 偏極オプションに最適化するという方向性もあるかも。



## まとめ

---

- ▶ 10 Hz, 500 kW, ショートパルス, パラ水素モデレーターの組み合わせは、ナノグループの装置群にとって1<sup>st</sup> TSを上回るメリットはありません。



## 全くの個人的な意見

※ナノグループの総意ではありません

### 個人的な意見 (1)

- ▶ 1<sup>st</sup> TSを大事に育てるという考え方はないのか？
  - ▶ ILLが1971年から50年近く、改良を重ねつつ世界最高の中性子施設として君臨してきた。
    - ▶ 1<sup>st</sup> TSもそれだけの長いスパンで育て上げることができるのではないか？
  - ▶ ショートパルス源としては本当に本当に優秀だと思うが、ロングパルスが有利な装置でESSとまともに戦っても絶対に勝てないし、勝てない勝負をしても仕方が無い。
    - ▶ 例えば、よりショートパルスに向けた装置に最適化したような線源に改良できるのであれば、そちらの方がESSと戦いやすいように思う。
  - ▶ せっかく頑張って作った（しかも1 MWは未達の）1<sup>st</sup> TSに見切りを付けるにはまだまだ早いのでは？



## 個人的な意見 (2)

- ▶ 「J-PARCでないとはできなかった」成果はどの程度？
  - ▶ ユーザー数をこなすという観点で言うと、小さなソースをたくさん作るというのは現実的な解。
    - ▶ JRR-3が止まっている今、需要(ユーザー数)に対する供給(装置数/ビーム強度)のバランスが崩れている。
    - ▶ ストーリーさえきちんとしてきていれば、2<sup>nd</sup> TSが1<sup>st</sup> TSより高性能である必要性は無い。
  - ▶ 逆に、強度が必要と言うのならその強い根拠が必要。
    - ▶ 単に「測定時間が短くなる」では説得する材料として不十分。
      - 外から見て全く魅力を感じない。
    - ▶ 放射光の場合は新しい測定技術が生み出され、それに必要なので次世代光源が必要、というサイクルが回ってきた。
      - 中性子で最近発案された、ビーム強度が必要な測定技術とは？
      - もちろんアイデアだけではダメ。Feasibilityの検証が必要。



## 個人的な意見 (3)

- ▶ ブレイクスルーとなるような技術開発が必要ではないか？
  - ▶ 放射光ではESRFが開発した技術が世界を席卷し、蓄積リングに回帰している。
  - ▶ 現時点の案は（少なくとも中性子に関しては）単なるこれまでの延長線上に見える。
    - ▶ それでは文科省もお金を出しにくい。
  - ▶ 何か核になる技術があれば錦の御旗になり得る。
    - ▶ 外から見てわかりやすいストーリーが必要。
    - ▶ 実は、わかりやすければ技術ではなくても良い。



## 個人的な意見 (4)

- ▶ 予算を決めておく必要はないか？
  - ▶ 加速器施設の規模は経済規模の制限を受ける。
    - ▶ ILCより大きな加速器はできないだろう。
  - ▶ 今回は単独での予算申請となるので、放射光施設建設と同程度の予算規模を目標とすべき
  - ▶ スパコンのFLOPS/Wのような指標で優れている、というのも一つの考え方。
    - ▶ 勝負に勝つために「ルールそのものを変える」というのは常套手段。脱「大艦巨砲主義」が必要ではないか。



## まとめ

- ▶ 本気で実現したいなら、内外の状況を見渡してもっと戦略的に動く必要があると思います。
  - ▶ 1<sup>st</sup> TSはすごいので、もっと大事にしましょう。
    - ▶ J-PARCを作れた貴重なチャンスをもっと生かすべきです。
  - ▶ 1<sup>st</sup> TSを使い倒しましょう。
    - ▶ 「これではやっぱり足りない」という要求をもっと積み上げる必要があります。無理矢理ニーズを作るのは邪道です。
  - ▶ 次に繋がる技術開発をしましょう。
    - ▶ 今の延長では話を聞いてもらえません。何か技術的なブレイクスルーが必要だと思います。
  - ▶ お金の話をしましょう。
    - ▶ 無い物ねだりをしては仕方がありません。現実的に何が可能かという考え方をしてはどうでしょうか。
- ▶ そして、これらのことをやろうと思ったらもっともっと時間が必要です。
  - ▶ その時間を確保するために、別の仕事を無くしましょう。



## 4. パルス中性子応用グループ

及川健一

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

パルス中性子応用グループは、MLF の実験装置群の中で BL04(ANNRI)、BL05 (NOP)、BL10 (NOBORU)、BL22 (RADEN) により構成される。第4回 MLF 将来計画技術検討会では、この中から BL04 および BL10 より挙げられた第2ターゲットステーション (TS) への要望を及川がとりまとめ発表を行った。

BL04 の紹介：

- 中性子断面積測定や中性子即発  $\gamma$  線分析を行っている。
- Ge デテクターによる核データの計測。2 eV~keV 程度の中性子を使用。
- 中性子捕獲断面積の研究～原子炉材料等の評価に使用。ADS 開発への利用。
- TOF を用いた即発ガンマ線分析法開発～特定元素にフォーカスした分析が可能となる。日本原子力研究開発機構 (JAEA) 基礎工グループで推進している。
- 外部ユーザーによる基礎物理学への応用も実施されている。

BL04 からの第2 TS への要望として、分析派からは、核燃が使用可であること、 $\alpha$  核種を含む非密封 RI が使用可であること。シングルバンチ、フード設備、20 m 位置で第1 TS に相当する強度が欲しい。300 keV まで使用するのでスーパーミラー等の光学系対応は難しい、等の意見があった。一方、核データ派からは、1 MeV まで中性子のエネルギー分解能の高いパルスが必要という意見があった。

まとめると、核燃・非密封 RI、試料環境を整えば第1 TS で対応可、ということでもある。

BL10 から第2 TS への要望は特に無いが、テストポート利用の観点からは、以下のように考えられる。

1.5 MW-25 Hz ダブルバンチを2つの TS へ分岐すると仮定した場合

- 1) 0.75 MW-25 Hz シングルバンチで分ける場合、ビームタイムが実質2倍になるメリットがあるだろう。常時シングルバンチは高エネルギー中性子利用にメリット。
- 2) 0.75 MW-12.5 Hz ダブルバンチで分ける場合、それ程メリットはない。MLF の BL10 や BL04 が 12.5 Hz となっても、得しない。
- 3) 第2 TS へ 0.5 MW-8.3 Hz ダブルバンチの場合、飛行距離の長い装置が作りやすくなる。結果として、タンデム利用やビームライン分岐も視野に入ってくるだろう。

## Neutron Instruments at MLF

### ■ Diffraction Group

- Single Crystal Diffractometer
  - BL03: iBIX for Bio-Materials Operation 2008~
  - BL18: SENJU Operation 2011~
- Powder Diffractometer
  - BL08: S-HRPD Hi-Resolution Operation 2008~
  - BL09: SPICA for Battery Mat. Operation 2011~
  - BL20: iMATERIA Hi-Intensity Operation 2008~
  - BL11: PLANET Hi-Pressure Operation 2010~
- Total Scattering Diffractometer
  - BL21: NOVA Operation 2008~
- Engineering Diffractometer
  - BL19: TAKUMI Operation 2008~

### ■ Nano-Structure Group

- Reflectometer
  - BL16: SOFIA Horizontal Operation 2008~
  - BL17: SHARAKU Polarized Operation 2011~
- Small&Wide-ANS
  - BL15: TAIKAN Operation 2010~

### ■ Spectroscopy Group

- Chopper Spectrometer
  - BL01: 4SEASONS Hi-Intensity Operation 2008~
  - BL12: HRC Hi-Resolution Operation 2008~
  - BL14: AMATERAS Cold-Neutron Operation 2009~
  - BL23: POLANO Polarized Commissioning
- Inverted Geometry Spectrometer
  - BL02: DNA Operation 2011~
- Neutron Spin-Echo
  - BL06: VIN\_ROSE Operation 2017~

### ■ Pulsed Neutron Application Group

- Neutron Source Diagnostic & Test Port
  - BL10: NOBORU Operation 2008~
- Neutron-Nucleus Reaction Meas. Instr.
  - BL04: ANNRI Operation 2008~
- Fundamental Physics
  - BL05: NOP Operation 2008~
- Neutron Imaging
  - BL22: RADEN Operation 2015~

## 第4回 MLF将来計画技術検討会 2018/01/18 パルス応用SG (J) より

### BL04の第2TSへの希望—分析派

- 核燃が使用可
- アルファを含む非密封が使用可 (RI取扱)
- シングルバンチ (バンチ幅もより小さい方が好ましい)
- 長尺かつ複数の測定ポイント (ないし複数のビームポート)
- 試料取扱いのためのフード設備 (化学実験含む)
- 中性子束は、中性子源からの距離にも依りますが、20m位置でも第1TSに匹敵する程欲しい。(出来るだけ強い方が好ましい)
- 数(2-10)meV-300keVくらい欲しい。

### BL04の第2TSへの希望—核データ派

- (少量)核燃料の利用
- 非密封RIの利用
- シングルバンチ
- 決められた時期(1月程度)でよいので、MLFよりも陽子幅の狭い (中性子のエネルギー分解能の良い) パルス
- 現状と同程度の中性子強度
- 熱中性子~1MeVくらい欲しい。

要約すると、核燃・非密封RI・試料環境が整えば、ほぼ第1TSで対応可。  
逆に言うと、それが出来ないならTS2に装置を作る積極的な理由はない。

第4回 MLF将来計画技術検討会 2018/01/18  
パルス応用SG (J) より

TS2のテストポートにおける、メリット・デメリット

仮定：加速器出力が最大で1.5MW-25Hz-ダブルバンチ

- ・ TS1とTS2に0.75MW-25Hz-シングルバンチ  
装置を作る積極的な理由はない。ビームタイムのみ増える。
- ・ TS1とTS2に0.75MW-12.5Hz-ダブルバンチ  
装置を作る積極的な理由はない。28m (=14m\*2) クラスのテストポートを作らない限り、12.5Hzは特に活かさない。ビームタイムのみ。
- ・ TS1に1MW-歯抜け25HzとTS2に0.5MW-8.3Hz-ダブルバンチ  
装置を作る積極的な理由はない。42m (=14m\*3) クラスのテストポートを作らない限り、8.3Hzは特に活かさない。  
ただし8.3Hzならば、長い装置が作りやすくなるので、BL05やBL06のようにガイド管でビームを分岐して、いくつかの実験を同時に並行して出来る可能性有り。その場合、1eVより上は出さない。

日本にどのようなパルス中性子源を整備すべきか  
原子炉の状況にはここでは触れない。個人的な意見。

**20年前 (1998年)**

大規模パルス中性子源…なし

中規模パルス中性子源…KEK KENS            4kW (1x10<sup>6</sup>)

小規模パルス中性子源…北大、他?            0.1kW (1x10<sup>4</sup>)

**現在 (2018年)**

大規模パルス中性子源…J-PARC MLF            0.5MW (0.5x10<sup>8</sup>)

中規模パルス中性子源…産総研の10kW電子線ライナックが建設開始?

→効率で言うと、陽子ビーム1kWクラスか?

→おそらく全国共同利用施設ではない?

小規模パルス中性子源…北大、RANS他、            0.1kW (1x10<sup>4</sup>)

→CANSは他にも増えて行く見込み

この先日本で中性子科学を持続・発展させて行くことを考えた場合、  
10~20年後に必要な中性子源は、『大』だろうか『中』だろうか。

## 日本にどのようなパルス中性子源を整備すべきか

原子炉の状況にはここでは触れない。個人的な意見。

### 現在（2018年）

技術・サイエンス共に回せていない



### XX年後（20XX年）

現在と大差無いのでは？



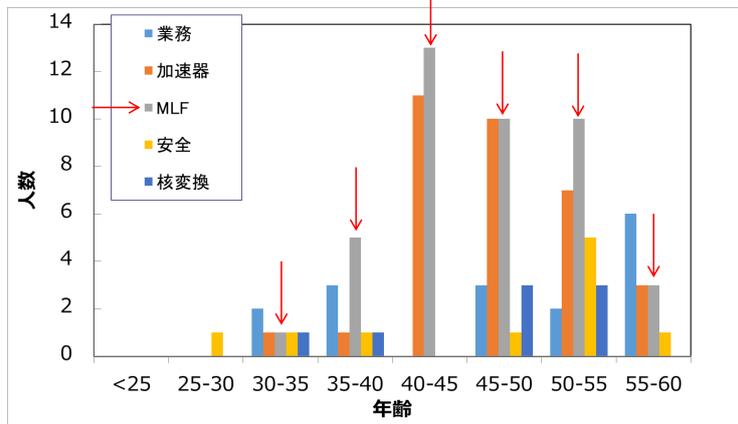
現在のMLFでも過労死が出そうなのに、それに輪をかけて職員員の負荷を増やして、誰が利するのか（誰の、何のためにやるのか）？

## 元気向上活動の活動計画 J-PARCセンター よりちょっと拝借

### 重要技術の伝承の危機対策

J-PARCでは大きな危機感を持つ。図1は、平成27年度のJ-PARCセンターのJAEA側の職員員の年齢構成分布を示す。

平成30年度はこれをほぼそのまま右に3年分シフトしたグラフになるはず



日本ではこれが中性子科学コミュニティに発生しているように思う。これを改善させられなければ、MLFは単なる分析センターになる。

~~が~~ ~~され~~

## 日本にどのようなパルス中性子源を整備すべきか

原子炉の状況にはここでは触れない。個人的な意見。

### 現在 (2018年)

技術・サイエンス共に回せていない

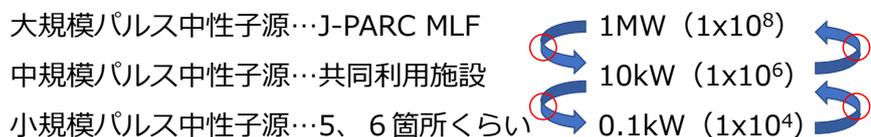


第3回の山田さんの個人的な意見より拝借

放射光の場合は新しい測定技術が生み出され、それに必要なので次世代光源が必要、というサイクルが回ってきた。  
 中性子で最近発案された、ビーム強度が必要な測定技術とは？  
 もちろんアイデアだけではダメ。Feasibilityの検証が必要。

### XX年後 (20XX年)

これなら持続・成長出来るだろう



→1MWで1年ターゲットが持つなら、10kWで100年持つ (使い捨て中性子源)

## 5. 分光グループ

梶本亮一

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

MLF 分光グループは、6 台の準弾性・非弾性中性子散乱装置からなる。その内訳は、直接配置型チョッパー分光器 4 台 (BL01 四季、BL12 HRC、BL14 アマテラス、BL23 POLANO)、逆転配置型結晶分光器 1 台 (BL02 DNA)、スピネコー型分光器群 1 つ (BL06 VIN ROSE) からなる (BL06 はさらに 2 台の装置 NRSE、MIEZE からなる)。MLF 将来計画技術検討会にあたり、分光グループ内で装置の現状、問題点、そして、新しい中性子源に対する要望について意見を集め、その結果を梶本がまとめて発表資料としたものが次ページ以降の資料である。

非弾性散乱装置は弾性散乱に比べて圧倒的に弱い散乱強度のために研究対称が限定されることが最大の悩みであり、そのため新しい施設ではまずは強度が欲しいという意見が多かった。その強度が必要なエネルギー領域は装置の種類にもより、現在の MLF では四季や HRC のような主に熱中性子を利用するような装置では 100 meV 以上の領域での強度が不足しており、一方で、現在の DNA や VIN ROSE のような装置では 1 meV 以下の領域での強度不足が指摘された。

しかしそれにもまして、第二ターゲットステーション (TS2) の前に第一ターゲットステーション (TS1) に対してまだやるべきことが多く残っている、現状の TS1 の運用で精一杯で TS2 まで手が回らないという声が強かった。この TS1 でやるべきこととして挙げられたものは装置や線源の高度化だけでなく、実験室等の付帯設備やソフトウェアが海外の施設の水準に比べて遅れており、まずはこれらの高度化が必要という意見もあった。

このような意見もあった中、あえて TS2 を作るとうるとどういう施設にすべきかという観点で意見をまとめると、およそ次のようであった：

**パルス周期：**周期は TS1 の 25 Hz が絶妙であるので、それより遅くする積極的なメリットはあまりない (ただし、「積分強度が落ちない」のなら遅くなって困ることはない)。例外として、スピネコー装置ではより低い周期 (12.5 Hz 以下) が欲しい。

**パルスシェイプ：**スピネコー装置は短パルスが必要という意見があったが、他

に具体的な要望はあまりなかった。おそらく、特に長パルスでないと困る装置はないと思われる。

**TS1 との関係：**大前提として、せっかく育てた TS1 の装置の性能をスポイルするようなものは止めて欲しい。TS1 と差別化をはかるべきであり、その差別化としては、

- ・ TS1 では高エネルギー vs. TS2 では低エネルギー
- ・ TS1 では高積分強度 vs. TS2 では高輝度
- ・ スピンエコーは TS2 で行うべき

といったものが考えられる。また、必ずしもより高性能の装置をつくるばかりでなく、一部の人気装置（例えばアマテラス）に関しては単純に装置の数を増やせるだけでも、競争率を下げて利用者を増やせるという点で TS2 のメリットはあるという意見もあった。

以上のような個々の技術的項目以外にも、TS2 では「やろう」という元気がでるくらいの性能向上が欲しいという、携わる者のモチベーションの重要性を指摘した意見もあった。また、そもそも MLF 関係者であっても装置について勉強不足、あるいは装置への関心が低い、ESS や SNS、ISIS の第二ターゲットステーション等の海外の新施設で注目されている逆転配置型装置に対する専門家が MLF に少ない、といった問題も指摘された。そうした状況に対して最近 MLF 内では有志の間で最新の装置について勉強する「装置勉強会」が立ち上がったが、こうした活動を通じてまずは MLF 内でも将来計画を自分の問題として議論できる雰囲気作りが重要と思われる。

# MLF将来計画検討会技術検討会 中性子・分光グループ

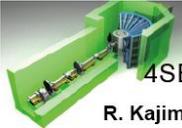
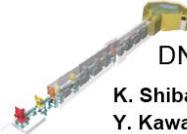
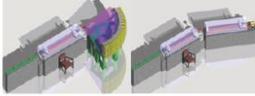
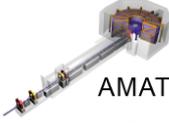
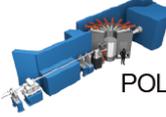
中性子利用セクション  
梶本亮一

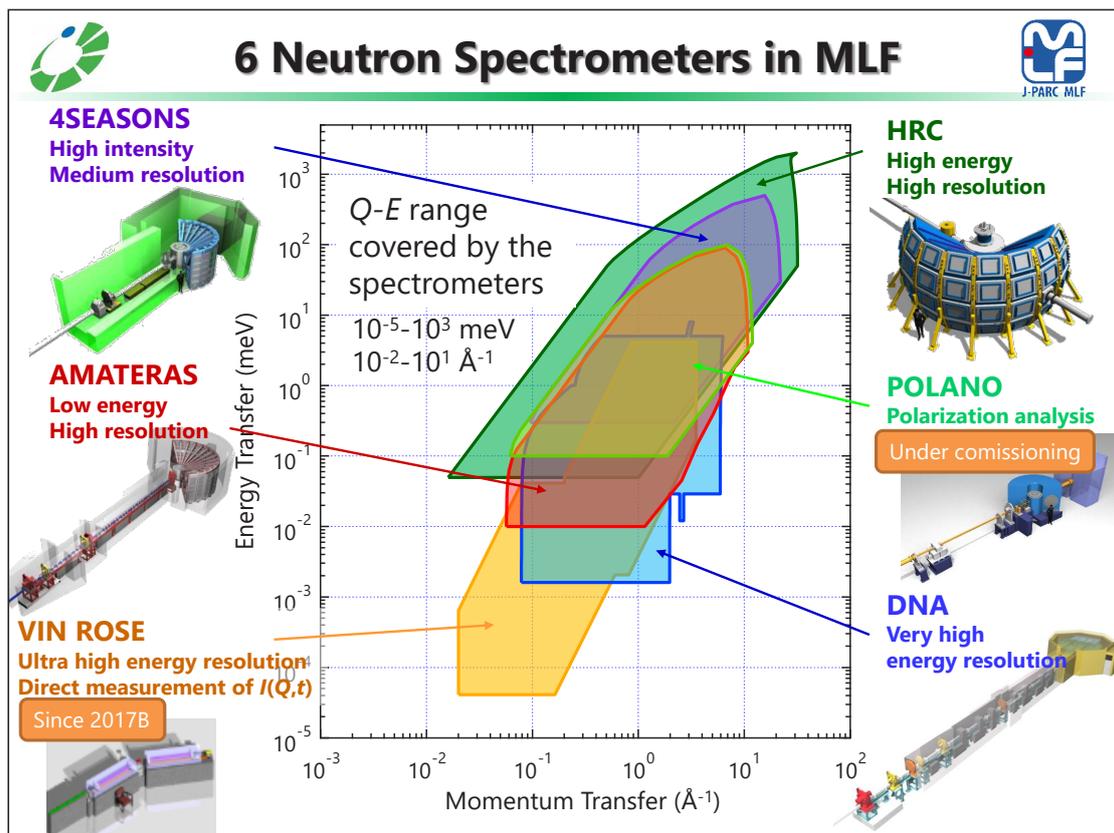


## MLF Spectroscopy Group

6 Instruments  
Leader: R. Kajimoto (JAEA); Sub-leader: T. Yokoo (KEK)


2

|  |  |   |
|--|--|---|
|  <p><b>4SEASONS(BL01)</b></p> <p><b>R. Kajimoto (JAEA)</b><br/> <b>M. Nakamura (JAEA)</b><br/>         Y. Inamura (JAEA)<br/>         K. Kamazawa (CROSS)<br/>         K. Ikeuchi (CROSS)<br/>         K. Iida (CROSS)<br/>         N. Murai (JAEA)<br/>         M. Ishikado (CROSS)</p>  |  <p><b>DNA(BL02)</b></p> <p><b>K. Shibata (JAEA)</b><br/> <b>Y. Kawakita (JAEA)</b><br/>         B. Li (JAEA)<br/>         H. Nakagawa (JAEA)<br/> <b>M. Matsuura (CROSS)</b><br/>         T. Yamada (CROSS)<br/>         T. Tominaga (CROSS)<br/>         M. Kobayashi (CROSS)</p> |  <p><b>VIN ROSE(BL06)</b></p> <p><b>H. Endo (KEK)</b><br/> <b>H. Seto (KEK)</b><br/>         N. Yamada (KEK)<br/>         M. Hino (Kyoto U)<br/>         T. Oda (Kyoto U)</p>  |
|  <p><b>HRC(BL12)</b></p> <p><b>S. Itoh (KEK)</b><br/> <b>T. Yokoo (KEK)</b><br/>         T. Hawaii (KEK)<br/>         T. Masuda (ISSP)<br/>         H. Yoshizawa (ISSP)<br/>         M. Yoshida (ISSP)<br/>         S. Asai (ISSP)</p> <p>D. Kawana (ISSP)<br/>         R. Sugiura (ISSP)<br/>         T. Asami (ISSP)<br/>         Y. Ihata (J-PARC)</p> |  <p><b>AMATERAS(BL14)</b></p> <p><b>K. Nakajima (JAEA)</b><br/> <b>S. O. Kawamura (JAEA)</b><br/>         M. Kofu (JAEA)<br/>         T. Kikuchi (Sumitomo/JAEA)</p>  |  <p><b>POLANO(BL23)</b></p> <p><b>T. Yokoo (KEK)</b><br/> <b>S. Itoh (KEK)</b><br/>         N. Kaneko (KEK)<br/>         T. Ino (KEK)<br/>         M. Fujita (Tohoku U)<br/>         Y. Ikeda (Tohoku U)<br/>         M. Ohkawara (Tohoku U)</p> |



### 各装置の（独断による）現状（1）

- HRC
  - 高エネルギー・高分解能
    - (A) 通常の $S(Q,E)$ 測定、(B) 高エネルギー(100~1000 meV)測定、(C) ブリルアン散乱
    - ブリルアン散乱で大きな成功、さらに高度化
    - △強度不足（特に高エネルギー）→(B)に影響
    - △検出器の不足
- 四季
  - 中分解能・大強度・高効率：multi- $E_i$  (RRM)、4次元 $S(Q,E)$ 測定
  - multi- $E_i$ の先駆的成功
  - △検出器の不足→ただし揃いつつある、Q領域の拡大
  - △驚くほど「大強度」でもない：特に100 meV超
  - △J-PARCだけでなく世界中でmulti- $E_i$ /RRM、さらに高度化



## 各装置の（独断による）現状（2）



5

- アマテラス
  - 低エネルギー・高分解能・高強度：教科書的な「非弾性中性子散乱」の領域をカバー
  - 強度に対する不満が一番少ない
  - 特殊試料環境での実験も多い
  - △~1 meVでは強度不足
  - △検出器不足
  - △マシンタイム不足、マンパワー不足←高い汎用性の裏返し
  
- DNA
  - 低エネルギー・高分解能・高S/N
  - multi-band(RRM)の先駆的成功
  - 分解能、S/Nで同種装置を大きく凌駕
  - △Si 311アナライザの不足→ただし揃いつつある、Q領域の拡大
  - △強度が不足？



## 各装置の（独断による）現状（3）



6

- VIN ROSE
  - 超低エネルギー・高分解能  
(A) MIEZE (B) NRSE の2本立て装置
  - 世界初のTOF-MIEZE実用装置
  - △MIEZEでユーザープログラム始まったばかり（NRSEはまだコミッショニング中）
  - △マンパワー不足？
  
- POLANO
  - 偏極非弾性
  - 偏極専用装置、偏極デバイスの開発、相関チョッパーによる非弾性散乱実験の実証
  - △まだコミッショニング中
  - △本質的に強度不足（→相関チョッパーで補う、ただしこれからの技術）

## 分光グループ・MLF将来計画検討会に向けたアンケート

2018年1月10日～

- (1)現状の装置・施設・線源の問題点・要望
- (2)新しい線源に対する要望
  - (2-1)繰返し周期
  - (2-2)パルスシェイプ
  - (2-3)強度
- (3)つくるべき装置
- (4)その他

### (1) 現状の装置・施設・線源の問題点・要望

- 今を生きるのが精一杯
- 施設として将来計画を持つべきであるが、今のMLFでは安全対策等の仕事が多すぎ、TS2ができるとそれが倍になると思うとやる気が出ない
- 実験室の場所が狭すぎる
- アクセス(?)が難しい
- ビームタイムが足りない(ので、実験するときにとっても緊張する)
- ユーザーさんが使いこなせていない

## (2)新しい線源に対する要望（その1）

### □ TS2はTS1より高性能であるべき、あるいは、差別化するべき

- きちんと目的別に分けるのが良い
  - ・ TS1は50meV程度の比較的高いエネルギーに最適化。50Hz。
  - ・ TS2は冷中性子。10Hz。
- 小さな試料を狙うために単位体積、単位時間あたりの強度（輝度）が高いビーム。
- 広いバンド幅を確保し幅広いサイエンスに対応するため、繰り返し周期は長く。
- KENS(数kW)がJ-PARC(1 MW)になったような迫力のある違い、TS2では時間平均強度でもILLを凌駕するくらいの性能がないとそもそも議論する元気が出ない。
- TS1の1MWに対して500kW相当の積分強度しか出ないのでは魅力がない。積分強度が低くても輝度で1桁上回るなら、微少試料測定用の装置をTS2、積分強度重視の装置をTS1という使い分けがあり得る。
- TS2は一流の装置が集まる施設であるべき

## (2)新しい線源に対する要望（その2）

### □ TS2はTS1と同等の性能、あるいは、低い性能でもよい

- TS1の25Hzの周期は絶妙。TS2でも同様でよい。
- ニーズの多い装置種（特に低エネルギー装置）では、性能がほぼ同じ、あるいは劣る施設であってもビームライン数（マシンタイム）が増えるメリットは大きい
  - ・ 1.5MWのダブルバンチを2つに分けて、25Hz 0.75MWの二つの同じ施設にするという案（明午さん提案）が魅力的
  - ・ 超低周期の施設をたくさん作ってターゲットごと大学等に占有させるという案（中谷さん提案）も魅力的
- 200kW程度の出力ならコストがだいぶ下がるので、あえてそうするという考えもあるのでは。

### □ TS1も重視して欲しい

- TS2のためにTS1の装置性能が低下するのは避けて欲しい。
- 加速器を1.5MWに増強して1MW+0.5MWにわけるくらいならTS1の出力を1.5MWにしてもよいのでは。

### (3) つくるべき装置

- 新しい装置ではRRMのさらなる高度化（Eiのよりflexibleな選択）が必須。
- 海外の状況を見ると、低エネルギー用の装置として逆転配置の装置が再び注目されているような印象を受ける。
  - 低エネルギー&大強度&low cost?
- 現状の装置よりもスペックを落として使いやすい、作りやすい装置を作ってもいいのでは。ハイ・ローミックスの考えをもっと取り入れる。
- 高輝度を活かした微量試料&特殊環境用非弾性散乱装置

### (4) その他

- JRR-3とMLFを物理的に接続する（試料、アクセサリ、人の行き来が自由に）
  - 接続通路沿いに、居室や各種実験室が立ち並ぶ
  - JRR-3 + MLF を一体運用した一大中性子研究センターを整備
- MLFの外壁をぶち抜いてMLF外周に実験（開発）室をぐるっと整備する
- 一番費用対効果が高い（伸びしろが高い）ものは、TS2よりもソフトウェア
  - 測定やデータの「結果」の取得がとても楽になる支援手段
  - 画像処理・数学・情報分野の技術を取り入れた高度な解析
    - ・ SNSでは数学家による中性子の論文も出ている

## (会議直前にいただいたご意見) VIN ROSEより

### > (1)現状の装置・施設・線源の問題点・要望

あくまでも「BL06」の問題点なのですが、一つのビームラインに2台の装置を設置しているため、実験スペースや遮蔽などで様々苦しい。2ndステーションができる場合、NRSEを移設した方が運用面では楽。

2ndフレームをメインで使っているので、繰り返し周期は低い方がよい。(ビームを半分捨てている状態。)

### > (2)新しい線源に対する要望

#### > (2-1)繰り返し周期

12.5Hz以下で問題ない。

#### > (2-2)パルスシェイプ

MIEZEを設置する場合、陽子ビームとしては、ショートパルス希望。  
NRSE & MEZEI型の場合、ビーム分散が多少大きくても大丈夫。  
モデレーターとしては、結合型冷中性子源希望。(長波長中性子が必要)

#### > (2-3)強度

強ければ強いほどよい。  
NSEとしては長波長中性子が欲しい。

### > (3)つくるべき装置

・ 2~3台、新規(新奇)な装置を作っても良いのでは？

### > (4)その他

## まとめ(1)

□ 非弾性散乱の最大の悩み：弱い散乱強度のため研究対象が限定される  
→まずは強度

- > 100 meV →HRC、四季
- < 1 meV →DNA、Spin-Echo

□ TS2の前にまだTS1でやることがある、TS2まで手が回らない、という声  
が大きい

## まとめ（2）

- それでもTS2を作るなら、
  - 周期は25 Hzが絶妙。遅くする積極的なメリットはあまりない（強度が落ちないなら遅くなくてもよい）。
    - ・ ただし、Spin-Echoでは低い周期（12.5 Hz以下）が欲しい
  - パルスシェイプについて具体的な要望はあまり出てこなかった
    - ・ Spin-Echoではshort pulse希望
    - ・ long pulseでないと困る装置はないと思われる
  - せっかく育てたTS1の装置の性能をスポイルするようなものは止めて欲しい
  - やろうという元気ができるくらいの性能向上が欲しい（強度または輝度で1桁以上）
  - TS1と差別化をはかるべき
    - ・ 高エネルギー vs 低エネルギー
    - ・ 高積分強度 vs 高輝度 等
    - ・ Spin-Echo
  - 一部人気装置に関しては、単純に装置の数を増やすだけでも競争率を下げるというメリットはある

## まとめ（3）

その他

- ESSは比較的低エネルギー向けの装置が多い
  - 高エネルギー（>100 meV）なら勝てる？（TS1向け？）
- 具体的な装置の議論まではほど遠い
  - 議論できる環境・雰囲気作りを
  - 全体的に勉強不足
  - 逆転配置型装置の専門家が不足
  - 装置勉強会・・・しかし・・・
    - ・ 発表したがるがない&人数が減っていく
    - ・ 「なるべく係わらないようにしています」 by とある若手

## 付録： MLF 中性子装置グループと中性子装置 [1,2]

### 結晶構造グループ

BL03 iBIX  
BL08 SuperHRPD  
BL09 SPICA  
BL11 PLANET  
BL18 千手  
BL19 匠  
BL20 iMATERIA

### ナノ構造グループ

BL15 大観  
BL16 SOFIA  
BL17 写楽  
BL21 NOVA

### パルス中性子応用グループ

BL04 ANNRI  
BL05 NOP  
BL10 NOBORU  
BL22 螺鈿

### 分光グループ

BL01 四季  
BL02 DNA  
BL06 VIN ROSE  
BL12 HRC  
BL14 アマテラス  
BL23 POLANO

### 参考文献

[1] Meet@MLF <http://mlfuser.cross-tokai.jp/ja/beamlines.html> (accessed 2018-12-26).

[2] K. Nakajima et al., Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at the Japan Proton Accelerator Research Complex II: Neutron Scattering Instruments, Quantum Beam Sci., vol. 1, no. 3 (2017) p. 9.

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

| 基本量   | SI基本単位 |     |
|-------|--------|-----|
|       | 名称     | 記号  |
| 長さ    | メートル   | m   |
| 質量    | キログラム  | kg  |
| 時間    | 秒      | s   |
| 電流    | アンペア   | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン   | K   |
| 物質량   | モル     | mol |
| 光度    | カンデラ   | cd  |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量                     | SI組立単位       |                    |
|-------------------------|--------------|--------------------|
|                         | 名称           | 記号                 |
| 面積                      | 平方メートル       | m <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の)        | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の)        | 1                  |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量                           | SI組立単位                |                   |                      |   |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---|
|                               | 名称                    | 記号                | 他のSI単位による表し方         | SI基本単位による表し方  |
| 平面角                           | ラジアン <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m   |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                      | s <sup>-1</sup>   |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>  |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                            |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                             |
| 電荷, 電気量                       | クーロン                  | C                 |                      | s A   |
| 電位差 (電圧), 起電力                 | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>             |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>             |
| コンダクタンス                       | ジーメン                  | S                 | A/V                  | m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>             |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                            |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>             |
| セルシウス温度                       | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K   |
| 光照射量                          | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd  |
| 放射線量                          | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd  |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                      | s <sup>-1</sup>   |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 酸素活性                          | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> mol   |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量             | SI組立単位            |                       |   |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---|
|                 | 名称                | 記号                    | SI基本単位による表し方  |
| 粘力のモーメント        | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>  |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>   |
| 角速度             | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>  |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>  |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                     |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>  |
| 熱伝導率            | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>  |
| 体積エネルギー         | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>  |
| 電界の強さ           | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>  |
| 電荷密度            | ジュール毎立方メートル       | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>  |
| 電表面電荷           | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> s A   |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A   |
| 誘電率             | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>2</sup> s A  |
| 透磁率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                         |
| モルエネルギー         | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>  |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                   |
| 照射線量 (X線及びγ線)   | ジュール毎モル毎ケルビン      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                   |
| 吸収線量率           | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> s A  |
| 放射線強度           | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>  |
| 放射輝度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 酵素活性濃度          | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>                |
|                 | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol  |

表5. SI接頭語

| 乗数               | 名称  | 記号 | 乗数                | 名称   | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>1</sup>   | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>2</sup>   | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>3</sup>   | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>6</sup>   | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>9</sup>   | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>12</sup>  | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨクト  | y  |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称    | 記号   | SI単位による値  |
|-------|------|---|
| 分     | min  | 1 min=60 s  |
| 時     | h    | 1 h=60 min=3600 s   |
| 日     | d    | 1 d=24 h=86 400 s   |
| 度     | °    | 1°=(π/180) rad  |
| 分     | '    | 1'=(1/60)°=(π/10 800) rad   |
| 秒     | "    | 1"=(1/60)'=(π/648 000) rad  |
| ヘクタール | ha   | 1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                      |
| リットル  | L, l | 1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1 t=10 <sup>3</sup> kg  |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称       | 記号 | SI単位で表される数値                                 |
|----------|----|---|
| 電子ボルト    | eV | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1 u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称        | 記号   | SI単位で表される数値  |
|-----------|------|--|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa  |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg=133.322Pa   |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m  |
| 海里        | M    | 1 M=1852m  |
| バイン       | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600)m/s  |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的関係は、<br>対数量の定義に依存。  |
| ベレル       | B    |  |
| デシベル      | dB   |  |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称                    | 記号  | SI単位で表される数値  |
|-----------------------|-----|--|
| エルグ                   | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J   |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N   |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>                          |
| フォト                   | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx                                       |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb  |
| ガウス                   | G   | 1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T   |
| エルステッド <sup>(a)</sup> | Oe  | 1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>                              |

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI単位で表される数値   |
|-----------|------|---|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                    |
| レントゲン     | R    | 1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                  |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                  |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                 |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                     |
| フェルミ      | f    | 1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                 |
| メートル系カラット |      | 1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg                         |
| トル        | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa   |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm=101 325 Pa  |
| カロリ       | cal  | 1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロ      | μ    | 1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m                                      |

