

研究成果展開事業

研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)

「産業ニーズ対応タイプ」

技術テーマ

「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」

完了報告書

研究課題名「He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発」

令和元年 5 月 31 日

プロジェクトリーダー

機関名: 国立大学法人 名古屋大学

氏 名: 瓜谷 章

I. 研究計画の概要

1. 研究の目標

He-3位置敏感型検出器群は、中性子回折実験等には必須の物であるが、これら従来のHe-3位置敏感型検出器は長尺で、かつ検出効率を上げるためガス充填圧力を高くするために、大量のHe-3ガスを必要とする。しかしながら昨今のHe-3ガスの価格高騰はすさまじいものがあり、特に予算が限られている施設では使用が難しくなりつつある。今後の小型中性子源の産業応用展開を考える上で、検出器の高コスト化は大きな障害となりうる。そこで本研究では、このHe-3位置敏感型検出器の代替検出器として、シンチレータを用いた位置敏感型検出器を開発することを目的としている。

具体的には、一つには図1に示したように、He-3位置敏感型比例計数管を、その形状を変えずに検出媒体をそっくりそのままシンチレータに置き換えたものである。シンチレータを用いた検出器の位置検出は、シンチレータ光を波長シフトファイバで波長変換したのちに、その上下で同時計測し、その発光量あるいは到達時間差から、中性子検出位置を得る。使用するシンチレータには、わが国で開発された中性子用シンチレータであるLiCaAlF₆(以下LiCAF [出願特許1])あるいは従来からより使用実績のあるZnS(Ag)(以下ZnS)を用いる。LiCAFについては、さらにこれを微細化して透明樹脂中に分散させたTRUST LiCAF(Transparent RUBber SheeT LiCAF)を用いる。今回は、このTRUST LiCAFを用いて、高検出効率、高計数率特性、高いガンマ線弁別性能を有する位置敏感型中性子検出器を開発する。

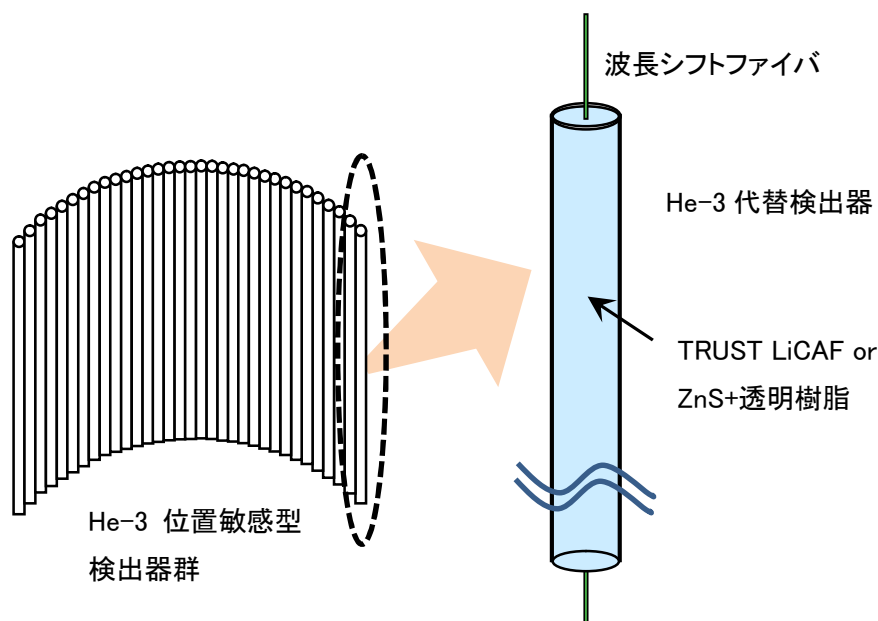


図1 中性子回折装置 He-3 位置敏感型検出器群とその代替検出器

今一つには、図2に示すように、円環状のTRUST LiCAFをすきまなく球殻状に配置して、 4π ジオメトリの、小型でかつ高検出効率の回折実験用の中性子検出器を開発することである。TRUST LiCAFは、高い機械的な柔軟性を有するので、このような形状の検出器を作製することが容易である。個々の環状のTRUST LiCAFは、その中に埋め込んだ波長シフトファイバの両端から光信号を得ることにより行う。おのこの環状のTRUST LiCAFは独立した検出器として動作するので、本装置の中性子散乱角度に対する角度分解能は、この球殻の半径とTRUST LiCAFの幅の幾何学的要因により決定されることとなる。具体的な数値目標についてはⅢ-2において詳述する。

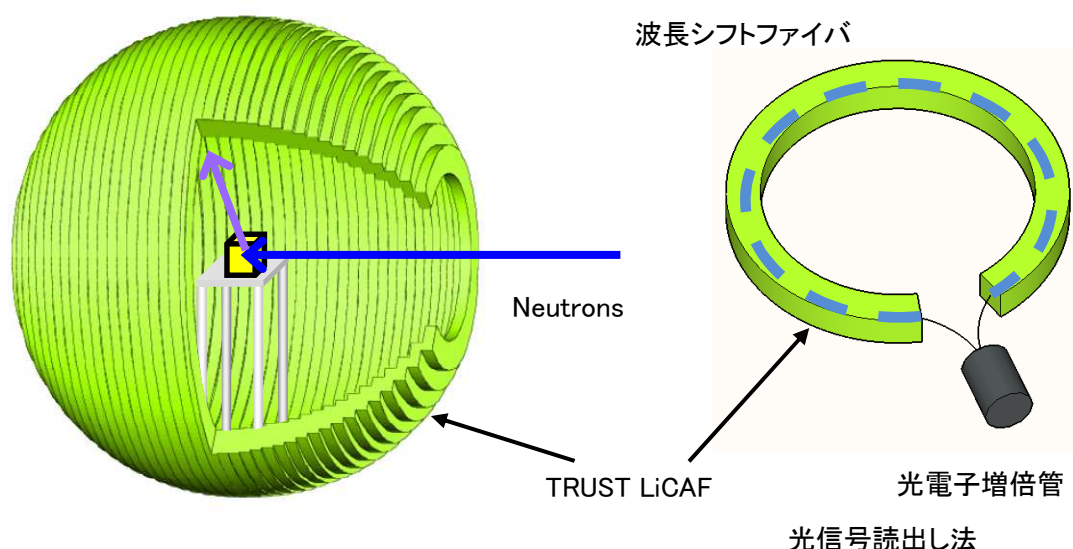


図2 球殻状配置多重円環中性子検出器群と信号読出し法

検出器開発に加え、要素技術として、用いる材料に関しても検討を行う。本研究で主に用いるTRUST LiCAFの開発はごく最近 (Watanabe *et al.*, NIM-A, 784, 260, 2015) であり、用いる LiCAF の組成や製法を改良することで更なる特性の向上が見込まれる。現状は Eu を添加した LiCAF の単結晶を微小に破碎して樹脂に充填する手法で製造しているが、そもそも当初からセラミック化する事で製造の手間の軽減が期待される。微小片の樹脂埋め込み型シンチレータは、LiCAF 以外にもあらゆる固体シンチレータに適用が可能な方法であるため、LiCAF 以外の中性子用シンチレータの組成 (例えば、希土類添加 LiF、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ガラス) の探索もあわせて行う。

材料開発に加え、検出器要素に関しても検討を行う。具体的には既存材料で特性のよく分かっている ZnS シンチレータとシンチレーション光の読み出しに MPPC を用いた長軸

一次元位置敏感検出器の開発も行う。MPPCはガンマ線計測等では実績があるが、中性子計測にはあまり用いられていないため開発要素が大きい。当該検出技術は、当然のことながら図1、2で示す検出器にも適用可能であるために、これら検出器の更なる感度向上を図る事も可能である。また TRUST LiCAF と ZnS を用いた一次元検出器を比較する事で、双方の長所も明確となる。

以上のようなHe-3ガス代替検出器を開発し、中性子計測を安価かつ手近でできるようにし、もって我が国の中性子の産業利用、科学技術の発展に寄与したい。産業競争力の観点では、我が国の放射線検出器、特に中性子検出器の製造業者の競争力の向上に資するものであると言える。He-3ガスの日本国内の市場価格は、10Lあたり360～430万円（2015年10月調べ）であり、以前と比べて10倍程度に高騰している。また、He-3ガスの主要供給国である米国は、米国内での供給を優先する政策をとっており、日本の放射線検出器の製造業者は米国の製造業者に比べて、非常に不利な立場に立たされている。また放射線検出装置一般についても、日本国内においても米国製を筆頭に多数の外国製品が出回っている。今回主として用いるLiCAFは、日本で開発された中性子用検出器であり、なかでもTRUST LiCAFはHe-3比例計数管に優るとも劣らない諸特性を有している。今回開発する2種類の位置敏感型検出器はもとより、本プロジェクト内で開発する新規シンチレータ、シンチレータの安価な製造方法等を総合的に利用した中性子計測システムとして世に出したい。また、放射線検出器メーカーとの協同が前提ではあるが、開発した中性子計測システムの世界的な展開を図ることを目標の一つに据えている。

2. 研究実施予定表 非公開

3. 研究費 非公開

Ⅱ. 研究成果の創出状況

4. マイルストーンの達成状況

CP1 試作検出器の正常動作の確認

50cm 程度の有効長を有する、長軸位置敏感型検出器を実際に作製することと、中性子の検出が可能であることを実証すること。

○達成状況 1 m 以上の有感長を持つ長軸 TRUST LiCAF シンチレータの中に波長シフトファイバを通し、両端に光電子増倍管(PMT)を接続することで長軸中性子検出器を構成した。波長シフトファイバ両端の光量比より、発光位置を推定する方式について試験を行った結果、両端の PMT で中性子に対応するピークは確認でき、長軸検出器を構成できる見通しを得たが、位置情報の取得に関しては容易ではないことが確認された。

CP2 試作検出器の正常動作の確認

実際に直径 30 cm 程度の球殻に、10 本程度の円環検出器を配置した試作機を実際に作製すること。個々の円環検出器の信号を、個々独立に取得、処理できることを確認すること。

○達成状況

長軸の TRUST LiCAF シンチレータの中に波長シフトファイバを通した構造の中性子検出器を製作した。TRUST LiCAF の持つ柔軟性を利用し、この検出器円環状にした。円環状検出器を複数本の製作し、球殻の一部に配置した検出器を試作した。また、円環状検出器の応答評価試験を行った。波長シフトファイバの両端からの光信号を足し合わせることで、円環上の位置に寄らず一様な感度応答を示すことを確認した。

CP3 試作検出器の正常動作の確認と新規提案手法の原理検証

50cm 程度の有効長を有する、長軸位置敏感型検出器を実際に作製することと、中性子の検出が可能であることを実証すること。両面読出しによる信号波高の向上を確認。

○達成状況

全長 1 m の波長シフトファイバ分断型一次元位置敏感型検出器を作製した。波長シフトファイバ分断型位置敏感検出器は、TUEST LiCAF のシンチレーション光を光拡散用ライトガイドを介して複数本バンドルした波長シフトファイバを用いて集光する方式を取っている。波長シフトファイバは途中に分断面を設けてあり、分断面を境に左右に分かれている。この分断面を等間隔に配置することで、波長シフトファイバの左右で収集される光量が、中性子検出位置に応じてデジタル的に変化するような仕組みとなっている。実際に製作した波長シフトファイバ分断型一次元位置敏感型検出器による動作検証試験を行い、位置検出が可能であることを実証した。加えて、波長シフトファイババンドルをシンチレータの両面に配置することで、

集光効率が向上し信号波高が向上することを確認した。

CP4 試作検出器の性能向上を確認

有感長を、おおむね 1m 程度に延ばすこと。中性子に対する位置分解能として、10%程度が達成されていることを確認すること。

○達成状況

上述の有感部 840 mm の長軸波長シフトファイバ分断型一次元位置敏感型検出器を作製した。製作した一次元検出器の応答評価試験を京都大学原子炉実験所の中性子導管を用いた E-3 ビーム孔にて実施した。E-3 ビーム孔では、熱中性子のみがほぼ平行なビーム状で来ており、これを Cd 製の直径 4 mm のコリメータでビーム成形し検出器に照射した。結果として空間分解は半値幅で 80 mm となっており、相対位置分解能(有感部 840 mm)で目標としていた 10%を達成されていることが確認された。

CP5 試作検出器の性能向上を確認

円環検出器の設置密度を、2 倍程度に上げる。実際に散乱中性子を計測できることを実験的に実証すること。

○達成状況

多重円環中性子検出器として全立体角の 95%をカバーでき、角度分解能 2° 以下を達成できるように断面積 4×4 mm の円環検出器を 79 本配置したものを製作した。79 本すべての検出器の信号波高スペクトル中に中性子ピークが確認され、すべての検出器が動作していることを確認した。読み出し回路として LiTA 回路を整備した。79 本の検出器の波長シフトファイバの両端を各々 9 グループに分け、同時計数される組み合わせにより各々の検出器を識別する方式を採用することで、光電子増倍管のアノードの読み出し数を少なくなるようにした。最終的に、小型中性子源 KUANS にて中性子回折実験を行い、鉄粉末の回折ピークを観測することに成功した。

CP6 LiCAF セラミックスの製法を確立

一般的なセラミックスの確認手法である SEM による粒界観察を行い、LiCAF セラミックスが合成出来ている事を確認する。均質なグレインが得られていれば、セラミックス化が成功しているとみなす事が可能。

○達成状況

SPS 法、メカノケミカル法のそれぞれを用い、LiCAF セラミックスの合成手法を確立した。これらを用いて、材料メーカーの協力のもと、問題なく TRUST 化が行えることを確認した。特に SPS 法を用いたサンプルに関しては、不透明バルク体のままでもパルス波高値スペクトルにおいて明瞭な熱中性子ピークの検出に成功した。一方でメカノケミカル法を用いる場合には、 ZrO_2 ボール・部材など、ある程度以上の硬度を有するものが必要があることが明らかと

なった。従来の TRUST LiCAF は、(i) 融かしてチョクラスキー法で単結晶育成 (ii) 単結晶の破碎 (iii) TRUST 化を行っていた。本研究では SPS を用いて、固相反応で十分な性能のセラミックスを合成可能であることを示し、(i) の過程において、合成温度や日数の大幅な短縮が可能である事を示した。更に検討を進め、メカノケミカル法でもセラミックス LiCAF を合成可能であることを示した。こちらの手法の場合には、性能的にはまだ改善の余地が残るものの、(i)のみならず(ii)過程も省略可能である可能性を示した。これらはコスト低減的な観点において、大きく進んだ部分であると言える。

CP7 100 種以上の Li、B 含有シンチレータの開発

LiMAF、LiCAF、LiSAF、LiF、 $\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-AlPO}_4$ 、 $\text{Li}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO-B}_2\text{O}_3$ ベースなど合わせて 100 種類以上の新規シンチレータを開発し、シンチレーション物性を評価する。

○達成状況

100 種以上の新規シンチレータの開発を行い、約三割の物質からパルス波高値スペクトル計測において、明瞭な熱中性子ピークの観測に成功した。特に有望なものとしては、 LiMgAlF_6 、 LiAlO_2 、 LiGaO_2 、 LiF-CaF_2 等である。本研究では、熱中性子に対して相互作用断面積の大きな B 系材料も検討したが、結果として Li 系を凌駕する物質を発見する事が出来なかった。Q 値的には Li 系の半分程度であるため、Li 系シンチレータの半分程度の発光量を示すものが得られる可能性を期待していたが、現状、見いだせていない。未探索な材料系も含め、B 系で発光効率の高い新規シンチレータを見出し、そのキーパラメータを明らかにする事は、分野的に今後の課題であると考えられる。

具体的に開発した物質は、 $\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-AlPO}_4$ ガラス 10 種、 $\text{Li}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ ガラス 5 種、 $\text{ZnO-B}_2\text{O}_3$ ガラス 5 種、 $\text{BaO-B}_2\text{O}_3$ ガラス 7 種、 $34\text{Li}_2\text{O-5MgO-10Al}_2\text{O}_3\text{-51SiO}_2$ ガラス (Li-glass 型組成) 10 種、 $20\text{LiF-24Li}_2\text{O-5MgO-10Al}_2\text{O}_3\text{-51SiO}_2$ ガラス (複合アニオン Li-glass) 5 種、 $25\text{Li}_2\text{O-25SiO}_2\text{-50B}_2\text{O}_3$ ガラス 5 種、 $50\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-50B}_2\text{O}_3$ ガラス 5 種、 $\text{ZnO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ ガラス 6 種、 $\text{SrO-B}_2\text{O}_3$ ガラス 7 種、 Mn:LiCAF 結晶 3 種、 $(\text{Ti, V, Fe, Co, Ni Cu}): \text{LiCaAlF}_6$ 結晶 5 種、 Tb:LiCaAlF_6 結晶 2 種、 Li(Al, Ga)O_2 結晶 2 種、 LiBaAlF_6 結晶 1 種、LiF 結晶 2 種、 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ 結晶 1 種、 $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ 結晶 1 種、 LiF-CeF_3 セラミックス 3 種、 Eu:LiMgAlF_6 セラミックス 5 種、 LiF-CaF_2 共晶 10 種である。

CP8 波長シフトファイバと ZnS シンチレータを用いた長軸一次元位置敏感型検出器の開発

有感長を、おおむね 1m 程度に延ばすこと。中性子に対する位置分解能として、10%程度が達成されていることを確認すること。

○達成状況

1 年前倒しで、高い検出効率を維持したまま、位置分解能を持つ検出器を試作できた。28 年度は有感長が 40cm 長で 5cm の位置分解能を達成したが、比率では 12.5%であった。29

年度は有感長が 96cm 長で 3cm の位置分解能の検出器システムを完成できた。中性子に対する位置分解能として 3.1%が達成できた。

CP9 一次元検出器の性能比較

TRUST LiCAF 型と ZnS 型の検出器の比較を行い、双方の位置分解能を実験的に比較する事。

○達成状況

平成 29 年度の評価において頂いた、一次元検出器の開発については打ち切り、多重円環状検出器および二次元検出器の開発に注力すべきとのコメントに従い実施せず。

CP10 高検出効率、低ガンマ線感度の非位置敏感型中性子検出器の開発

TRUST LiCAF を用いた非位置敏感型中性子検出器(2 次元位置敏感型検出器としても動作可能)を、信号処理法を含めて名古屋大学と共同で開発する。

○達成状況

ADC を 64 入力持つ LiTA12h 読み出し回路を、LiCAF シンチレータの読出し回路に使用できるように努めた。その結果、チャージアンプのシェーピング時定数を 2μ 秒と長くすることで、LiCAF シンチレータの発光量を十分に積分することができるようになり、中性子ピークを観測できるようになった。また、LiTA12h 読み出し回路のプログラムを変更し、2 次元処理回路に使用できるようにした。その結果、京都大学原子炉実験所の中性子導管を用いた E-3 ビーム孔における試験で 64×64 のサイズの 2 次元処理を行い、中性子画像を取得することに成功した。

5. 研究計画全体の進捗状況

当該課題では以下の項目を実施した。

- ① TRUST LiCAF を用いた長軸一次元位置敏感型検出器の開発
- ② 球殻状配置多重円環中性子検出器群の開発
- ③ LiCAF セラミックスの製法確立
- ④ LiCAFの組成最適化および新規シンチレータ探索
- ⑤ 波長シフトファイバとZnS シンチレータを用いた長軸一次元位置敏感型検出器の開発
- ⑥ 高検出効率、低ガンマ線感度の非位置敏感型中性子検出器の開発



図 3-1 球殻状配置多重円環中性子検出器の写真

これらのうち①、②を名古屋大、③、④を奈良先端大、⑤を KEK が担当し、⑥については名古屋大と KEK が共同で担当した。

①TRUST LiCAF を用いた長軸一次元位置敏感型検出器の開発においては、実際に 1 m クラスの長軸一次元位置敏感型検出器を作製し、その位置分解能評価を行った。長軸のシンチレータからシンチレーション光を集めるために波長シフトファイバ(WaveLength-Shifting Fiber: WLSF)を利用し、その位置決め方式として、光ファイバ分断型を採用している。厚さ 5 mm の TRUST Eu:LiCAF を厚さ 10 mm の透明樹脂でサンドイッチした構造を取っている。直径 1 mm の WLSF を 10 本リボン状にバンドル化したものを 2 組製作し、透明樹脂の更に外側からサンドイッチした構造とし、シンチレーション光を読み出している。TRUST Eu:LiCAF シンチレータの全長は 840 mm で、長さ 1000 mm の WLSF バンドルで挟み込んである。合計 20 本の WLSF には 40 mm 間隔で分断面が配置されており、全体で 21 領域に分断されている。シンチレータと WLSF バンドルとの間に透明樹脂層を 10 mm 挟み込むことで、発光位置に依らずシンチレーション光がバンドル化されたすべての WLSF に均一に行き渡るようにした。WLSF の両端面に各々 1 個光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)を接続することで長軸一次元位置敏感型検出器とした。製作した一次元検出器の応答評価試験を京都大学原子炉実験所の中性子導管を用いた E-3 ビーム孔にて実施した。E-3 ビーム孔では、熱中性子のみがほぼ平行なビーム状で来ており、これを Cd 製の直径 4 mm のコリメータでビーム成形し検出器に照射した。両端の PMT で得られる出力信号波高値の比から中性子検出位置を推定することが出来る。結果として、製作した検出器は、照射位置を良く推定することができていることが確認でき、空間分解は半値幅で 80 mm(有感部 840 mm)であり、目標としていた相対位置分解能 10%が達成されていることが確認された。

②球殻状配置多重円環中性子検出器群の開発においては、球殻状配置多重円環中性子検出器を作製し、その性能評価試験を実施した。4x4 mm² の断面積を有する角柱型の TRUST Eu:LiCAF に直径 1 mm の溝を設け、そこに直径 1 mm の WLSF を添わせ、その周りに反射材となるテフロンテープを巻き付けた。TRUST Eu:LiCAF が柔軟であるため、この角柱型検出器は自由に曲げることが可能で、これを円形にすることで円環状検出器となる。角柱型検出器の両端から

WLSFを引き出し、これをPMTに接続する。これらは柔軟である一方、それら自身では形を保てないので、これらを固定するためのアルミニウム製の支持構造体を製作し、そこに円環状検出器を固定することとした。円環状検出器同士が重ならないように、回転楕円体形状の支持構造体とした。これに円環状検出器を79本巻き付けた。製作した球殻状配置多重円環中性子検出器の写真を図3-1に示す。これにより全立体角の95%をカバーでき、すべての方位において角度分解能 2° 以下を達成できる。読み出し回路としてLiTA回路を整備した。79本の検出器の波長シフトファイバの両端を各々9グループに分け、同時計数される組み合わせにより各々の検出器を識別する方式を採用することで、光電子増倍管のアノードの読み出し数を少なくなるようにした。結果として、図3-2に示すように全79本中ほぼすべての検出器で信号波高分布中に中性子ピークを示すことを確認した(2本は波長シフトファイバが破損)。

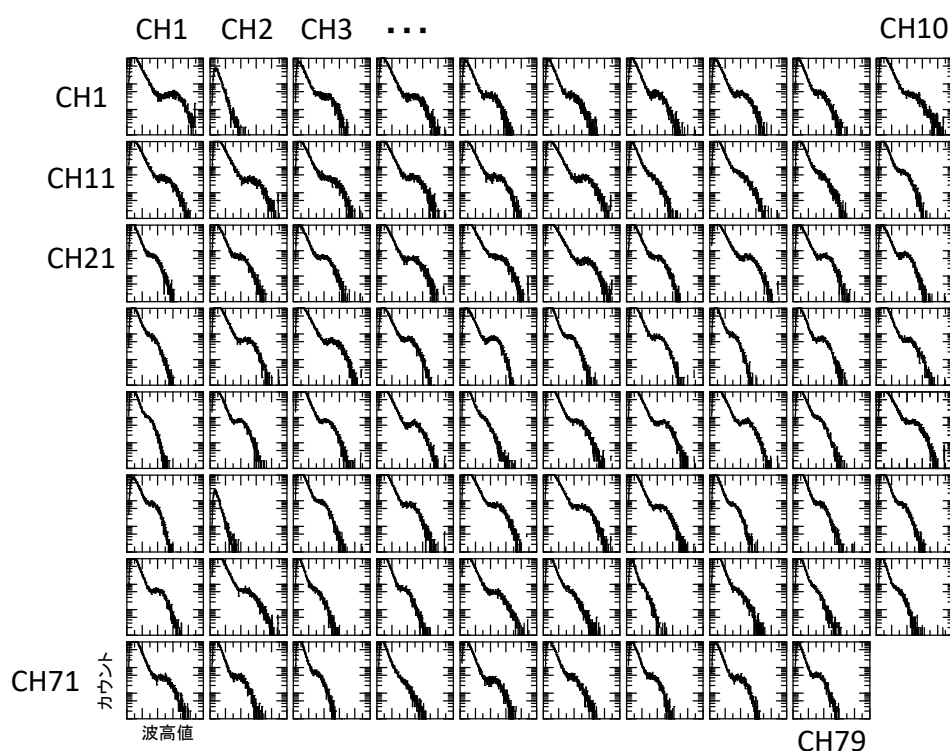


図3-2 全79個の円環中性子検出器の信号波高分布。CH2およびCH52は波長シフトファイバが破損。

最終的に、京都大学の小型中性子源KUANSにて中性子回折実験を行い、鉄粉末の中性子回折実験を行った。図3-3では検出器番号(回折角度)と飛行時間の二次元ヒストグラムを示すが、 α 鉄の(110)面に対応する筋が確認できる。すべての検出器の飛行時間を格子面間隔に変換し、格子面間隔のヒストグラムを作成したものを図3-4に示す。

得られた格子面間隔ヒストグラムのピーク幅から、格子面間隔測定の相対分解能 $\Delta d/d$ を評価すると、全検出器(CH1-CH79)を利用した場合で13%、分解能の比較的良好な後方の検出器(CH30-CH79)を用いた場合で6%と評価された。現状では、分解能を悪化させている主たる要因は、回折角度に起因するものである。今回、サンプルサイズが $\phi 15\text{mm} \times 20\text{mm}$ 程度と大きく、角

度の不確かさ要因としては、円環中性子検出器の幅よりサンプルサイズの寄与が大きい状況であることもわかった。このことは、中性子強度を高くできれば、サンプルサイズを小さくすることができ、結果として角度の不確かさを小さくでき、分解能は改善されることを意味している。

いずれにしても、鉄試料に対して(110)面以外の面についてもピークが確認され、中性子強度が十分でない KUANS でも中性子回折実験を行えることが示された。これにより、小型中性子源の産業利用に対し、大きな可能性が示せたと言える。

③LiCAF セラミックスの製法確立においてはSPS法を用いてバルクセラミックス体、メカノケミカルを用いて粉末セラミックス体の合成手法を確立した。Eu 濃度を 0.01～5% まで変化させた LiCAF バルクセラミックスを作製し、材料メーカーに TRUST 化を依頼した。結果として、問題なく TRUST 化が可能であることを確認し、さらに最適な Eu 添加濃度が 0.1%程度であることを確認した。その時点では不透明なバルクセラミックスのみならず、TRUST 化したサンプルにおいてもパルス波高値スペクトルにおいて明瞭な熱中性子ピークを観測する事が出来なかったが、セラミックスの合成条件（主に温度、圧力）を最適化する事で、図 3-5(右)に示すよう、不透明なバルクセラミックス体においてさえも明瞭な熱中性子ピークの観測に成功した。さらなるコスト低減を目指し、メカノケミカル法でのセラミックス合成の検討も行ったところ、ZrO₂ 部材などの硬度の高いものを用いる事で、セラミックス化自体は可能であるものの、特性はまだ改善の余地がある状況である。

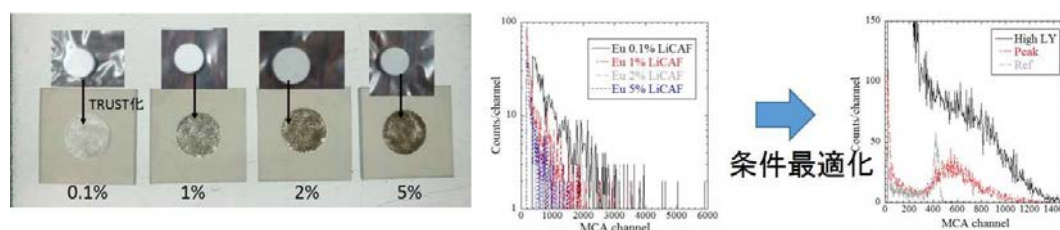


図 3-5 (左) SPS で作製し TRUST 化したサンプルと(中)その中性子照射時の波高スペクトル。
(右)条件最適化後のバルクセラミックス体での中性子照射時の波高スペクトル。

本実施項目の目的は LiCaAlF₆ のセラミックス化手法の確立であり、その目的自体は SPS 法、メカノケミカル法の双方で達成した。さらにこれらの手法を用いる事で、融液成長ベースのサンプルでは不可能な高濃度 Eu 添加を行う事に成功し、さらに SPS 法では作製条件を最適化する事で、発光量が市販品に優るサンプルの作製に成功した。元々単結晶 LiCaAlF₆ 開発時より、仮に Eu をより高濃度に添加する事が出来たならば、発光量は向上すると予想されていたため、その予想を検証した形となる。一方でメカノケミカル法を用いた場合には、ある程度以上に硬いボールや容器を用いなければ、LiCaAlF₆ を合成できない事が明らかとなった。LiCaAlF₆ の作製コスト的には従来の融液成長後に破碎 > セラミックバルク体を破碎 (SPS 法) > 初めから粉末 (メカノケミカル法) である。今後はなるべく混入の少ないボールや容器を用いて初めから LiCaAlF₆ 粉末を作製する条件の発見が課題となる。

④LiCAF の組成最適化および新規シンチレータ探索に関してはこれまで、図 3-6 に示すよう、単結晶、セラミックス、ガラス体における様々な Li もしくは B を含有したシンチレータを開発した。最終的に 100 種の新規物質を開発しており、目標を達成した。特に共晶体 (LiF-CaF_2 、 LiF-SrF_2)、 LiAlO_2 、 LiGaO_2 単結晶、Ce もしくは Pr 添加 $34\text{Li}_2\text{O-5MgO-10Al}_2\text{O}_3-51\text{SiO}_2$ ガラスからは ^{252}Cf からの中性子を照射した際、波高値スペクトルにおいて明瞭なピークが観測できており、添加物を加える事やその濃度の最適化で、さらなる特性向上が見込まれる。またセラミックス体においては LiMgAlF_6 の開発にも成功しており、上記の LiCaAlF_6 セラミックスと合わせて材料メーカーに TRUST 化を依頼したところ、明瞭な中性子ピークの観測はできなかったものの、LiCAF と同等の発光量を示した。ガンマ線への感度は LiMgAlF_6 の方が低いため、今後、合成条件を最適化していく事で、より高特性なシンチレータの発見が期待される。

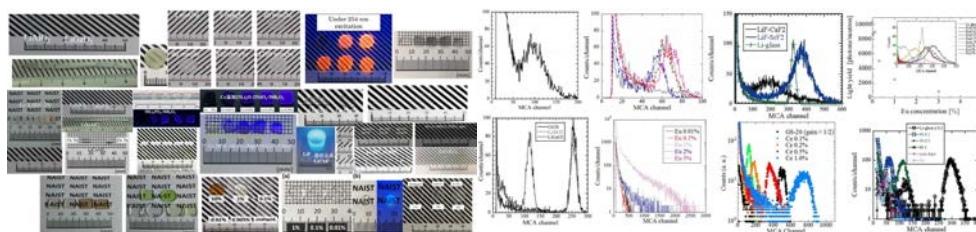


図 3-6 (左)開発した新規シンチレータと(右)その中性子照射時の波高スペクトル。

なおこれらの③、④は材料メーカーと協力しつつ進めており、特に今後は LiCAF に加えて LiMAF も開発項目に加えて研究を継続していく予定である。

本検討項目においては、有望なシンチレータとして LiAlO_2 および LiGaO_2 が見出された。これまで、中性子とガンマ線の波形弁別性能を有するシンチレータは有機物かハロゲン化物に限られてきた。前者は特にポータルモニタ等の野外応用において、すぐに劣化してしまう事が指摘されており、また後者は一般に潮解性を有する為、検出器としての設計自由度が限られてしまうという問題点があった。これに対して酸化物は一般に劣化耐性が高く、潮解性もないため、これまでの中性子用シンチレータの問題を克服できる可能性がある。そこで残りの研究期間を用いて、 LiAlO_2 および LiGaO_2 の発光起源や中性子検出性能の評価を行った。

図 3-7 には、名古屋大学にシンチレータを持ち込んで行った LiAlO_2 および LiGaO_2 の中性子、ガンマ線混在場における二次元ヒストグラムを示す。本実験では、中性子もしくはガンマ線イベントが検出されるたびに、Fast および Slow の二つの積分時定数を用いて信号を積算し、それぞれを縦横軸としてプロットしたものである。波形弁別性能を有するシンチレータでは、LET 効果に基づく線種における蛍光減衰時定数の違いを利用しており、適切な積分時定数を設定する事によって、中性子とガンマ線イベントを弁別する事が可能である。図に示すよう、 LiAlO_2 および LiGaO_2 において、ガンマ線起因の信号と中性子起因の信号を明瞭に分離する事が出来た。

これらの弁別性能 (Figure of Merit: FOM) を計算したところ、 LiAlO_2 は 0.75、 LiGaO_2 は 0.88 となった。これらサンプルは天然 Li を用いて作製しており、FOM の計算上、 ^6Li 濃縮原料を用い、

中性子イベント数が増せばその分だけ向上する。そのため今後は、発光中心の添加や合成条件の最適化を行い、FOM が優れた組成において ${}^6\text{Li}$ 濃縮を試みる予定である。

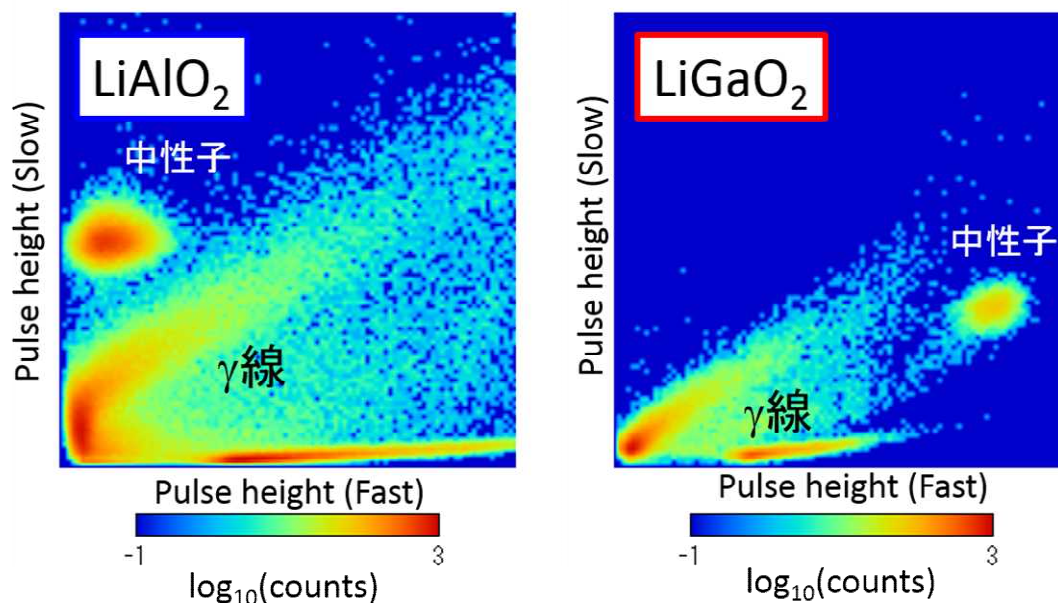


図 3-7 LiAlO_2 および LiGaO_2 の中性子、ガンマ線混在場における二次元ヒストグラム。

⑤波長シフトファイバと ZnS シンチレータを用いた長軸一次元位置敏感型検出器の開発においては、TRUST LiCAF と比べて発光量が大きく、かつガンマ線との弁別特性も良く、これまで中性子のイメージング等に広く使用されてきた実績のある ZnS シンチレータと、波長シフトファイバを組み合わせた、長軸の位置敏感型検出器の開発を①の課題と並行して試みた。ZnS は LiCAF に比べて同一エネルギー付与に対する発光量が大きいので、高い位置分解能が得られる可能性があるため、これを実験的に検証した。当初は、波長シフトファイバの減衰を利用した位置敏感型検出器の開発を行ったが、十分な S/N が得られないことが判明したので、ピクセル型検出器の開発を行った。中性子に対する位置分解能として 3.1%が達成でき、十分に使用できる検出器が完成できた。図 3-8 に開発した 96cm 長の長軸一次元位置敏感型検出器と位置データを示す。3cm 間隔で 32 個の検出素子を配置したので、3cm の位置分解能が得られたことが確認できた。

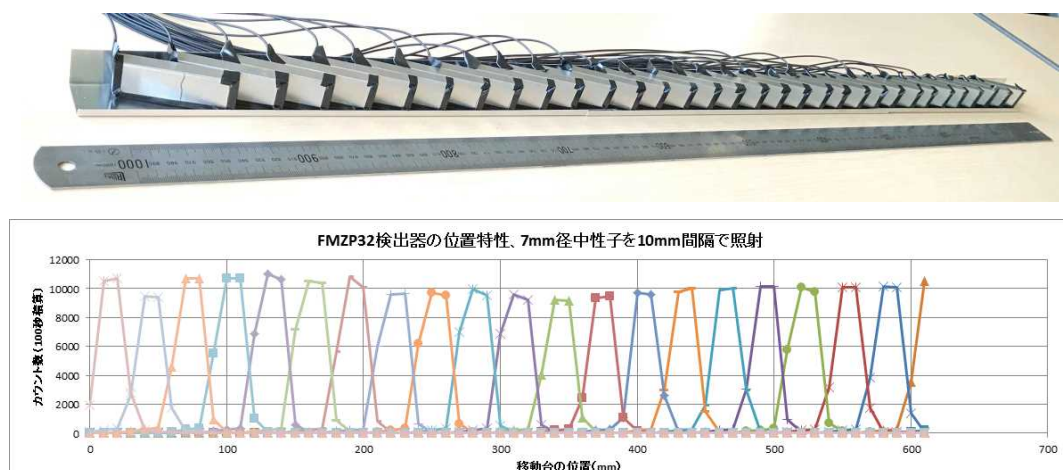


図 3-8(上)開発した 96cm 長の長軸一次元位置敏感型検出器と(下)その位置データ

LiCAF と ZnS シンチレータを容易に交換できる 2 次元位置敏感型検出器の開発を行った。γ 線感度については ZnS シンチレータが有利であった。位置分解能については LiCAF シンチレータが有利であった。図 3-9 にカドミウム (Cd) 文字と薄いボロン浸透用紙と、4 分割に重心計算した 2 次元図を示す。Cd の K 文字が高位置分解能で見えることが確認できた。また、うっすらとボロン浸透用紙と保持用のテープの影が見えている。

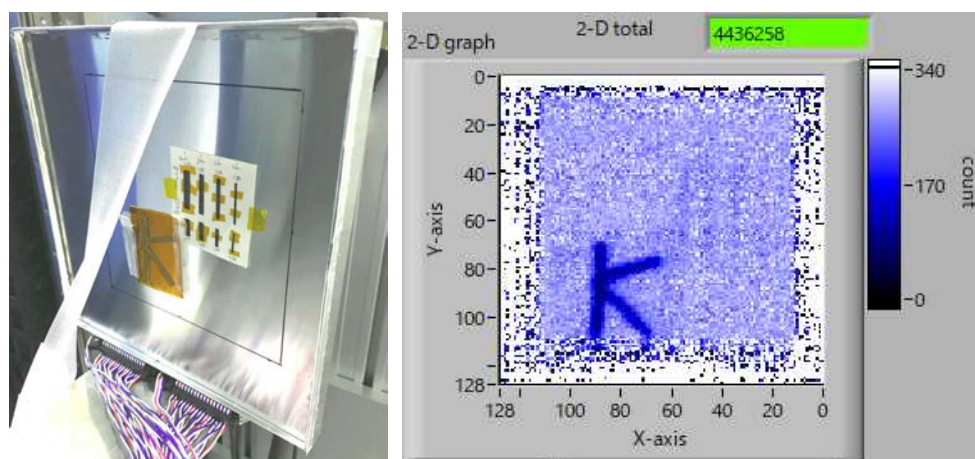


図 3-9(左)Cd 文字と薄いボロン浸透用紙と(右)4 分割に重心計算した 2 次元図

⑥高検出効率、低ガンマ線感度の非位置敏感型中性子検出器の開発の名古屋大学との共同研究においては、今までに高エネ研が独自開発してきた LiTA システムを活用し、非位置敏感型の多入力中性子検出器を構成することが可能となった。また、信号読み出し回路のプログラムを変更することで 2 次元位置敏感型検出器にも対応可能となった。今回利用した読み出し回路では、波形弁別を行うことが可能であり、Eu:LiCAF シンチレータ部での発光と波長シフトファイバ内でのガンマ線起因の発光事象を分離可能である。また、チャージアンプの時定数を従来の LiTA シ

システムで用いられていた 220 ns から 2・s に変更した。各々の回路で得られた信号波形の例を図 3-10 に示すが、従来のチャージアンプでは単一イベント中の発光信号をすべて積分できていなかったものが、時定数を伸ばすことですべて積分できるようになっていることが確認できる。

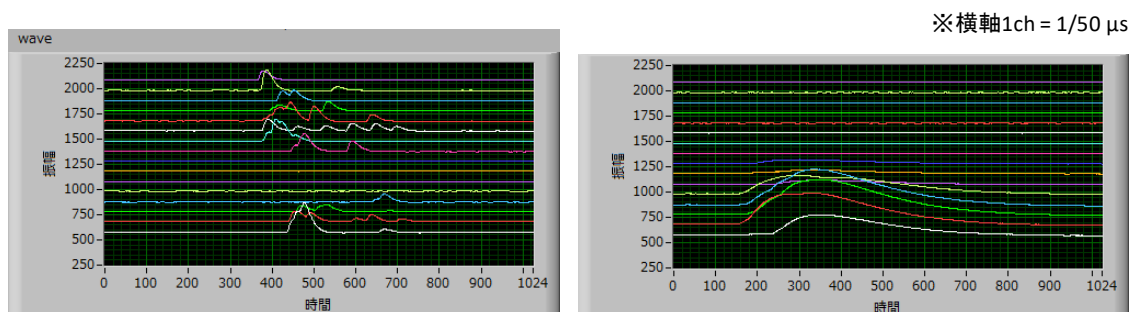


図 3-10 観察された信号波形(左:220 ns アンプ、右:2 μs アンプ)

また、図 3-11 に信号波形弁別により波長シフトファイバ内発光事象を除去した際の信号波高分布を示すが、チャージアンプの時定数を調整することにより中性子によるピークが確認できるようになった。

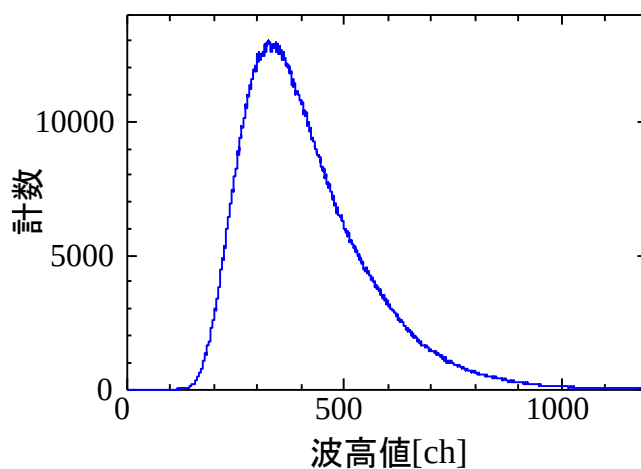


図 3-11 信号波高分布

開発した信号読み出し回路と TRUST LiCAF を活用し 2 次元位置敏感型検出器を製作した。製作した検出器の写真と模式図を図 3-12 に示す。この検出器の応答評価試験を京都大学原子炉実験所の中性子導管を用いた E-3 熱中性子ビーム孔にて実施した。B₄C ゴムシートを用いて被写体を作製し、撮像試験を実施した。用いた被写体と得られた中性子画像を図 3-13 に示す。示した中性子画像は、中性子ビーム及び検出器の検出効率に空間依存性があるため、これらをキャンセルするために、被写体を置いて撮像した画像を、何も置かず撮像したブランク像で規格化した。図 3-13 に示されているように、今回開発を進めた回路によって、大面積の中性子検出器を構

成することが可能であり、さらにこの回路を活用することで二次元画像の取得も可能であることが示された。

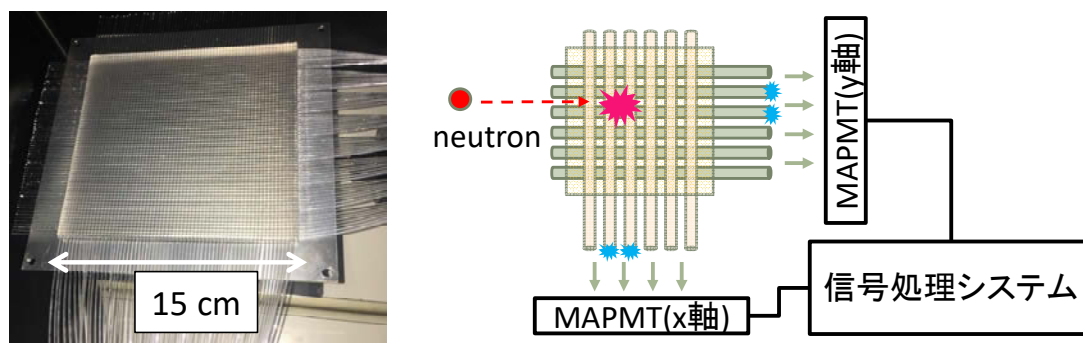


図 3-12 TRUST LiCAF を用いた 2 次元位置敏感型検出器の写真と模式図

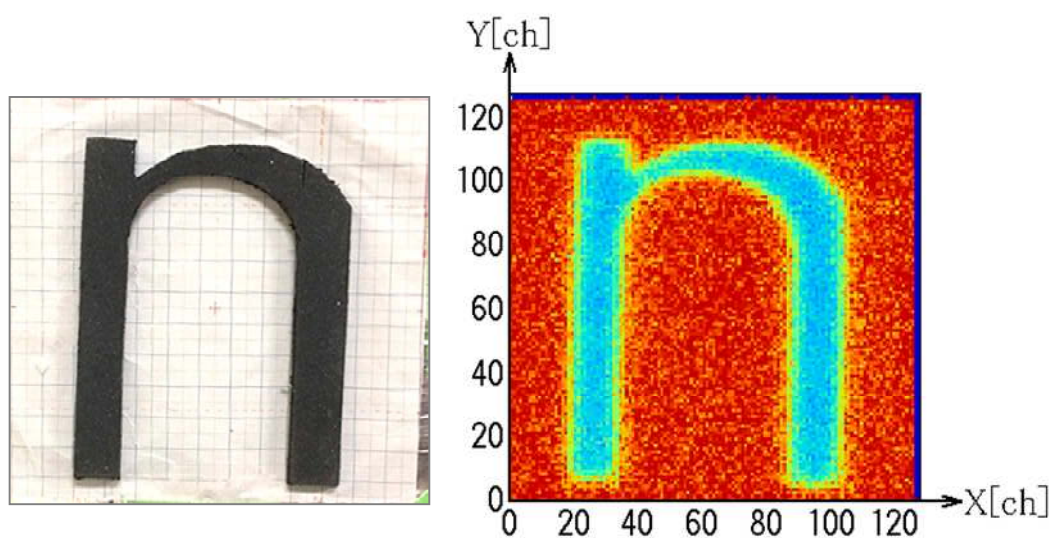


図 3-13 左)被写体(B ゴムシート)の写真と、右)得られた中性子画像

6. 研究実施状況

名古屋大のグループでは、プロジェクトリーダーを務める瓜谷に加え、渡辺准教授、山崎助教が主たるメンバーとして事業を進め、これに井口教授、富田准教授が助言をするという形で進められた。さらに大学院生の M2 志水、M1 今井が補助者として加わりプロジェクトを進めてきた。

奈良先端大のグループにおいては、柳田教授、河口准教授、D2加藤、D2中内、M2 赤塚、M2 木村の計 6 名で研究開発を進めてきた。研究開発の過程では、現金沢工大の岡田講師（奈良先端大在職時は助教）、秋田大の河野講師（奈良先端大在職時は助教）らの協力も得られた。名古屋大のプロジェクトリーダーの研究グループとはこれまでも密に共同研究を行ってきており、双方の教員や学生が互いの研究室を行き来して実験するなど協力して研究開発を進めている。プロジェクトリーダーのグループにはこのような恒常的な共同研究を通じて、新たな材料や物性を見出した際には迅速に情報共有がはかられている。

高エネ研では、佐藤前任技師が単独で研究開発を進めていたが、後半は、名古屋大学の開発する検出器の読み出し回路の共同研究開発を行った。研究費は主に ZnS 検出器とその処理回路の研究開発に用いており、LiCAF シンチレータの開発の奈良先端大と、LiCAF 検出器の名古屋大学とは相補的な使用目的となっている。

研究費については、検出器開発を進める名古屋大、主にサンプルの合成と基礎物性の評価を行った奈良先端大、ZnS 検出器とその処理回路の研究開発に用いた KEK のグループでお互いに相補的に使用させていただいた。

また、グループ間ミーティングに限らず、日頃より担当者間で綿密に情報交換を行うことで、お互いに有機的な連携を図り、円滑に事業を進めることができた。

プロジェクトリーダーとしては、事業全体を良くオーガナイズ出来ていたと自負しており、特にプロジェクト終盤の球殻状配置多重円環中性子検出器の信号読み出し回路の整備の段階で、名古屋大と KEK が互いに協力し合ったことで、非常に良い成果につながったと言える。

7. 産学の対話の活用状況

特に TRUST LiCAF を用いた中性子検出器に関して、産業界からも大きな期待の声を頂き、プロジェクトを進める上で大変励みになった。加えて、プロジェクト終盤、球殻状配置多重円環中性子検出器のテスト試験を行う段階で、吉澤 PO、理研グループ等からサンプルの選定、バックグラウンド対策等の様々な助言を頂き、最終的に KUANS という中性子強度が比較的低い小型中性子源施設においても、粉末中性子回折を実施可能であること示すことができた。

今後も実用化に向けた開発を進めて行く予定であるが、引き続き企業、JST、今回の参画機関での意見交換を実施してゆきたい。

8. 創出された研究成果(企業との共同研究、特許、論文など)のリスト

①企業との共同研究等(共同研究、サンプル・ノウハウの提供など) 非公開

②-1論文・著書(査読付き)

(国内) 該当なし

(海外)

1. T. Yanagida, K. Fukuda, G. Okada, K. Watanabe, N. Kawaguchi, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 6982–6988 (2017).
2. T. Yanagida, M. Koshimizu, Y. Fujimoto, K. Fukuda, K. Watanabe, G. Okada, N. Kawaguchi, *J. Lumin.*, 191 22–27 (2017).
3. T. Yanagida, Y. Fujimoto, M. Koshimizu, N. Kawano, G. Okada, N. Kawaguchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 86, 094201 (2017).
4. N. Kawaguchi, N. Kawano, G. Okada, T. Yanagida, *Sens. and Mater.*, 29 1431–1438 (2017).
5. G. Okada, K. Fukuda, N. Kawaguchi, T. Yanagida, *Rad. Meas.*, 106 134–139 (2017).
6. T. Yanagida, Y. Fujimoto, M. Koshimizu, N. Kawano, G. Okada, N. Kawaguchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 86, 094201 (2017).
7. T. Yanagida, Y. Fujimoto, M. Koshimizu, N. Kumamoto, G. Okada, N. Kawaguchi, *Scintillation and Dosimeter Properties of LiAlSi₂O₆ and LiAlSi₄O₁₀ Crystals*, *Sens. and Mater.*, 29 1399–1405 (2017).
8. N. Kawaguchi, N. Kawano, G. Okada, K. Fukuda, T. Yanagida, *Scintillation and Dosimetric Properties of Tb-doped LiCaAlF₆ Single Crystals*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57 02CB13 (2018).
9. T. Yanagida, *Inorganic scintillating materials and scintillation detectors*, *Proceedings of the Japan Academy, Series B* 94 75–97 (2018).
10. Y. Isokawa, S. Hirano, N. Kawano, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, *J. Non-Crystalline Solids*, 487 1–6 (2018).
11. N. Kawano, N. Kawaguchi, K. Fukuda, G. Okada, T. Yanagida, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29 8964–8969 (2018).
12. N. Kawano, N. Kawaguchi, K. Fukuda, G. Okada, T. Yanagida, *Opt. Mater.*, 82 60–64 (2018).
13. S. Satoh, *Physica B Condensed Matter in ICNS2017*, DOI 10.1016/ j.physb.2018.03.011, (2018).
14. N. Kawaguchi, G. Okada, K. Fukuda, T. Yanagida, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, accepted (2019).
15. T. Yanagida, K. Watanabe, G. Okada, N. Kawaguchi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 919 64–67 (2019).

16. N. Kawaguchi, N. Kawano, G. Okada, T. Yanagida, J. Lumin., 206 634–638 (2019).
17. N. Kawano, N. Kawaguchi, K. Fukuda, G. Okada, T. Yanagida, Opt. Mater., 82 60–64 (2018).
18. H. Shimizu, K. Kino, S. Sato, K. Watanabe, A. Uritani, S. Yoshihashi, A. Yamazaki, “Development of One-Dimensional Position-Sensitive Neutron Detector Using TRUST Eu:LiCAF Scintillator”, *JPS Conf. Proc.*, **22**, 011020 (2018).

②ー2論文・著書(査読無し)

(国内)(海外) 該当なし

③学会発表(招待講演含む)

(国内)

1. 柳田健之, 河口範明, 岡田豪, 福田健太郎, 藤本裕, 渡辺賢一, 山崎淳, 瓜谷章 中性子計測用 LiF-CaF₂, LiF-SrF₂ 共晶体シンチレータの開発日本セラミックス協会第 29 回秋季シンポジウム 広島大 9.7-9 (2016) ポスター.
2. 河口範明, 加藤 匠, 岡田 豪, 藤本 裕, 柳田健之, Eu 添加アルカリ土類アルミノホウ酸塩ガラスの放射線励起発光, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市 朱鷺メッセ, 2016/9/13-16 招待.
3. 河口範明, 岡田 豪, 柳田健之, 福田健太郎, LiF:W 及び LiCaAlF₆:Eu シンチレーターの中性子応答特性比較, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市 朱鷺メッセ, 2016/9/13-16 ポスター.
4. 柳田健之, 越水正典, 倉島 俊, 岩松和宏, 木村 敦, 田口光正, 福田健太郎, 藤本 裕, 浅井圭介, 岡田 豪, 河口範明, Ce 添加 LiCaAlF₆ シンチレータにおける LET 特性, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市 朱鷺メッセ, 2016/9/13-16 ポスター.
5. 辰巳浩規, 岡田 豪, 河口範明, 正井博和, 柳田健之, 銀添加 Li₃PO₄-BPO₄ ガラスの RPL 特性, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市 朱鷺メッセ, 2016/9/13-16 ポスター.
6. ³He 代替位置敏感型中性子検出器の開発, 志水 裕昭, 木野 幸一, 佐藤 節夫, 瓜谷 章, 渡辺 賢一, 吉橋 幸子, 山崎 淳, 日本原子力学会中部支部 第 48 回研究発表会, 名古屋大学 12/14-15 (2016).
7. Alpha-particle imaging with Eu³⁺ ions doped 35SrO-15Al₂O₃-50B₂O₃ glass scintillator, N. Kawaguchi, T. Kato, G. Okada, T. Yanagida, IWIRM 12, 3-5 Dec. Japan (2016).
8. X-ray Induced Luminescence Properties in Ce-doped 30MgO-50B₂O₃-20Al₂O₃ Glasses for Radiation Measurements, D. Nakauchi, Y. Fujimoto, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, IWIRM 12, 3-5 Dec. Japan (2016).
9. Dosimeter properties of silver-doped Li₃PO₄-BPO₄ glass, H. Tatsumi, G. Okada, T. Yanagida, H. Masai, IWIRM 12, 3-5 Dec. Japan (2016).

10. Thermoluminescence properties of Tb³⁺-doped CaO-Al₂O₃-B₂O₃-based glasses, H. Ono, Y. Fujimoto, T. Yahaba, T. Yanagida, M. Koshimizu, K. Asai, IWIRM 12, 3-5 Dec. Japan (2016).
11. Photoluminescence and radiation induced luminescence properties of Ce-doped alkaline earth borate glasses, A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, IWIRM 12, 3-5 Dec. Japan (2016).
12. TRUST Eu:LiCAF を用いた一次元位置敏感型中性子検出器の開発, 志水 裕昭, 木野 幸一, 佐藤 節夫, 渡辺 賢一, 山崎 淳, 吉橋 幸子, 瓜谷 章, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 東海大学湘南キャンパス, 3/27-29 (2017).
13. 岡田 豪, 福田 健太郎, 河口 範明, 柳田 健之, 中性子検出用 LiCaAlF₆:Eu²⁺セラミックスシンチレータの開発, 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017.3.16 ポスター.
14. 加藤 匠, 岡田 豪, 河口 範明, 柳田 健之, Ce 添加 BaO-Al₂O₃-B₂O₃ ガラスのシンチレーション特性, 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017.3.16 ポスター.
15. 辰巳浩規, 岡田豪, 河口範明, 柳田健之, 正井博和, Ce 添加リン酸塩ガラスの放射線応答特性における濃度依存性, 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017.3.16 ポスター.
16. 中内 大介, 越水 正典, 岡田 豪, 古場 祐介, 福田 健太郎, 藤本 裕, 河口 範明, 浅井 圭介, 柳田 健之, Ce:LiCaAlF₆ 単結晶の熱蛍光における LET 依存性, 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017.3.16 ポスター.
17. 柳田 健之, 福田 健太郎, 岡田 豪, 渡辺 賢一, 瓜谷 章, 河口 範明, Mn 添加 LiCaAlF₆ 結晶のシンチレーションおよびドシメータ特性, 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017.3.16 ポスター.
18. Hiroaki Shimizu, Koichi Kino, Setsuo Sato, Kenichi Watanabe, Akira Uritani, Sachiko Yoshihashi, Atsushi Yamazaki, "Development of one dimensional position-sensitive neutron detector using TRUST Eu:LiCAF", NOP2017(Nara, Japan, 5-8 July, 2017).
19. 河野直樹, 河口範明, 福田健太郎, 岡田豪, 柳田健之 Eu 添加 ⁶LiF-CaF₂ 共晶体の放射線検出特性, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 9/5-8 博多 (2017) ポスター.
20. 磯川 裕哉, 平野翔太郎, 河野直樹, 岡田豪, 河口範明, 柳田健之, Ce 添加 50Li₃PO₄-50B₂O₃ ガラスのドシメータおよびシンチレータ特性, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 9/5-8 博多 (2017) ポスター.
21. 平野翔太郎, 河野直樹, 岡田豪, 河口範明, 柳田健之, Sn 添加 ZnO-SiO₂-B₂O₃ ガラスの放射線誘起蛍光特性, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 9/5-8 博多 (2017) ポスター.
22. 河口範明, 加藤匠, 河野直樹, 岡田豪, 藤本裕, 柳田健之, Eu 添加ストロンチウムアルミノホウ酸塩ガラスのシンチレーション特性, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 9/5-8 博多 (2017) ポスター.
23. 河口範明, 河野直樹, 岡田豪, 福田健太郎, 柳田健之, 中性子シンチレーター用 Li-Ce 系複合フッ化物セラミックスの開発と特性評価, 日本セラミックス協会 第 30 回秋季シンポジウム

9/19-21 神戸大 (2017) ポスター

24. 佐藤節夫, 高検出効率な波長シフトファイバー多層位置敏感型中性子検出器の開発, 中性子科学会年会, 福岡大学, 2017 12/2-3, ポスター.
25. 志水 裕昭, 木野 幸一, 佐藤 節夫, 渡辺 賢一, 山崎 淳, 吉橋 幸子, 瓜谷 章, TRUST Eu:LiCAF を用いた中性子の一次元位置検出方法の検討, 次世代放射線シンポジウム(放射線夏の学校)(2017 年 8 月 17 日~19 日 静岡).
26. 今井頌, 山崎淳, 渡辺賢一, 吉橋幸子, 瓜谷章, TRUST Eu:LiCAF による多重円環構造を採用した中性子回折計の製作, 第 49 回日本原子力学会中部支部研究発表会, (2017 年 12 月 14 日-15 日 名古屋).
27. 志水裕昭, 木野幸一, 佐藤節夫, 渡辺賢一, 瓜谷章, 吉橋幸子, 山崎淳, TRUST Eu:LiCAF を用いた一次元位置敏感型中性子検出器の特性評価, 日本原子力学会 2018 年春の年会, 2018 年 3 月 26 日-3 月 28 日, 大阪.
28. 柳田健之, 藤本裕, 越水正典, 渡辺賢一, 岡田豪, 河野直樹, 河口範明, LiGaO₂ 結晶の中性子検出用シンチレータ特性, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 3/17-20, 早稲田大 (2018) ポスター.
29. 柳田健之, 岡田豪, 藤本裕, 越水正典, 河野直樹, 河口範明, LiAlSi₂O₆ および LiAlSi₄O₁₀ 結晶の放射線応答特性, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 3/17-20, 早稲田大 (2018) ポスター.
30. 柳田健之, シンチレータおよびドシメータ材料の開発と展望, 第 50 回日本セラミックス協会ガラス部会夏季若手セミナー, 7/30-8/1 大阪 (2018). 招待講演.
31. 河口範明, 粒子放射線計測用シンチレータ, 次世代放射線シンポジウム 2018, 8/6-8 白浜 (2018). 招待講演.
32. 今井頌, 渡辺賢一, 山崎淳, 吉橋幸子, 瓜谷章 “TRUST Eu:LiCAF を用いた小型中性子回折装置の製作と動作確認”, 応用物理学会放射線分科会 次世代放射線シンポジウム(放射線夏の学校) (2018 年 8 月 6 日~8 日 和歌山 グランパス inn 白浜)
33. 河口範明, 中内大介, 岡田豪, 福田健太郎, 柳田健之, 高線量放射線計測への応用に向けた Nd 添加 LiCaAlF₆ 単結晶の作製及び評価, 日本セラミックス協会第 31 回秋季シンポジウム 9/5-7 名工大 (2018).
34. 柳田健之, 福田健太郎, 岡田豪, 河口範明, Eu:LiCaAlF₆ におけるシンチレーションとエネルギー蓄積蛍光の関係, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 9/18-21, 名古屋国際会議場 (2018).
35. 河口範明, 岡田豪, 二見能資, 福田健太郎, 柳田健之, Ce 添加及び Eu 添加 LiCaAlF₆ 単結晶のシンチレーション特性の温度依存性, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 9/18-21, 名古屋国際会議場 (2018).
36. 河口範明, 岡田豪, 二見能資, 福田健太郎, 柳田健之, 新規フッ化物中性子シンチレータの開発, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 9/18-21, 名古屋国際会議場 (2018). 招

待講演.

37. 今井頌, 渡辺賢一, 山崎淳, 吉橋幸子, 瓜谷章, TRUST Eu:LiCAF を用いた小型中性子回折装置の製作と動作確認, 次世代放射線シンポジウム 2018, 8/6-8, 和歌山 (2018).
38. 今井頌, 渡辺賢一, 山崎淳, 吉橋幸子, 瓜谷章, TRUST Eu:LiCAF を用いた小型中性子回折装置の製作, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 9/18-21, 名古屋国際会議場 (2018).
39. 今井頌、渡辺賢一、山崎淳、吉橋幸子、瓜谷章“TRUST Eu:LiCAF を用いた小型中性子回折装置の製作”、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会(2018 年 9 月 18 日～21 日 名古屋国際会議場)

(海外)

1. T. Yanagida, Development of scintillator materials and scintillation detectors, ICOOPMA 2016, 6/12-17, Montreal, Canada (2016) (Invited).
2. T. Kato, G. Okada, T. Yanagida, Scintillation properties of BaO-Al₂O₃-B₂O₃ glasses doped with Eu₂O₃, ICOOPMA 2016, 6/12-17, Montreal, Canada (2016) ポスター.
3. T. Yanagida, G. Okada, K. Fukuda, K. Watanabe, Optically and thermally stimulated luminescence of Ce-doped and Eu-doped LiSrAlF₆ crystals, 18th International Conference on Solid State Dosimetry, Munich, Germany July 3 – July 8 (2016) ポスター
4. T. Yanagida, M. Koshimizu, Y. Fujimoto, K. Fukuda, G. Okada, Scintillation properties of alkaline metal doped LiCaAlF₆, 19th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC' 16), Paris, July 17-22 (2016) ポスター.
5. N. Kawaguchi, N. Kawano, G. Okada, K. Fukuda, T. Yanagida, Scintillation and Dosimetric Properties of Tb-doped LiCaAlF₆ Single Crystals, EM-NANO 2017, Fukui, 18-21 (2017) ポスター.
6. S. Satoh, Development of a Fiber Multilayered ZnS Position Sensitive Neutron Detector System with High Detection Efficiency, ICNS2017, 韓国・デジョン, 7/9-13(2017)ポスター.
7. Neutron and gamma-ray Pulse shape discrimination of LiAlO₂ and LiGaO₂ crystals, T. Yanagida, K. Watanabe, G. Okada, N. Kawaguchi, SORMA XII, Michigan, 10-14 June (2018) ポスター.

④知的財産(特許権、実用新案権など)

(i)特許出願 (国内)(海外) 該当なし

(ii)特許登録 (国内)(海外) 該当なし

⑤他制度への展開 非公開

⑥その他(受賞、新聞報道、招待講演、展示会等の出展など)

1. 辰巳浩規, 岡田豪, 河口範明, 正井博和, 柳田健之, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 放射線分科会 学生ポスター賞 銀添加 $\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-BPO}_4$ ガラスの RPL 特性.
2. 柳田健之 第 13 回(平成 28 年度)日本学術振興会賞 2017.2.8.
3. 河口範明, 応用物理学会放射線分科会 放射線奨励賞 (2018).

Ⅲ. 今後の展開

9. 成果の今後の展開

今のところ、放射線計測器メーカー等からの引き合いは無いが、要請があれば製品化等に協力したい。中性子回折実験用の多重円環中性子検出器については、小型中性子源の中でも比較的中性子強度の低い KUANS においても粉末試料の回折像を取得することが可能であることを実証したので、より一層の性能向上を図るとともに、小型中性子源への普及も視野に入れたい。