

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561025

研究課題名(和文)液体金属噴流の革新的制御方法に関する基礎研究

研究課題名(英文)Study on new concept for control of liquid metal jet

研究代表者

帆足 英二 (Hoashi, Eiji)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40520698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：IFMIFなど加速器中性子源でビームターゲットとして用いられる液体金属リチウム噴流に対して、磁場による制御を可能とする革新的な磁気誘導液体金属ターゲット(MGLT)の概念を提案し、シミュレーションを用いて性能を実証した。この中で、噴流を磁場で湾曲させる条件を得るのに、慣性力と電磁力の比である無次元数、相互作用係数を用いることが有効であることを示した。実証実験で用いる代替液体金属のガリウム噴流向けにMGLTのサイズと形状を最適化し、計算によりガリウム実験のパラメータの検討とその性能を実証した。これらの計算を基に、ガリウム試験ループを設計、製作した。

研究成果の概要(英文)：For liquid metal lithium jet used as a beam target in accelerator-based neutron source such as IFMIF, we proposed innovative magnetically guided liquid metal target (MGLT), which enable us to control liquid metal jet using magnetic field, and demonstrated the performance of MGLT using two dimensional simulation. In this demonstration, we showed that interaction coefficient, which was the ratio of the inertia force with the electromagnet force, was effective to get the condition for curving liquid metal jet by magnetic field. Next, we optimized the size and the shape of MGLT for gallium jet, which is the alternative liquid metal to lithium, used in our substantiative experiment. In addition, using simulation, we obtained experimental conditions of gallium jet and demonstrated the performance of MGLT for gallium jet. Finally, based on these results of simulation, we designed and made gallium test loop.

研究分野：熱流動工学

キーワード：液体金属噴流 電磁流体 磁場制御

### 1. 研究開始当初の背景

現在、液体金属リチウム(Li)噴流をターゲットとした加速器中性子発生装置の開発に関する研究が進められている。主に、核融合炉材料開発のための中性子照射施設、国際核融合炉材料照射施設(International Fusion Material Irradiation Facility : IFMIF)、癌治療法であるホウ素中性子捕獲療法(Boron Neutron Capture Therapy : BNCT)向けの小型中性子源が挙げられる。これらは、液体金属 Li 噴流にビームを当てて中性子を発生させるという同じ概念から成り立っている。いずれも噴流を定常的に流すために、液体金属 Li を噴出するノズルと、液体金属 Li が流れる流路でターゲット部が構成される。ビームの入射面を自由表面とし、装置の構成上、流路側に発生する中性子をその目的に応じて利用する。

しかしながら、発生した中性子束は流路材で減衰される上に、流路は放射化し、設備交換時には放射性廃棄物となる。そのため、IFMIF では流路材料に高価な低放射化フェライト鋼が採用される。また、噴流形状を維持するため、流路は3面が壁面、1面が自由表面というコの字型になっており、ビームは自由表面に向かって照射され、流路底に向かって中性子が発生する。発生する中性子は、比較的広角に広がるため、周辺材料全てにこの低放射化フェライト鋼の採用が必要となる。

他方、入射ビームの安定性の関係で、ビーム照射を受ける液体金属 Li 噴流部では高真空環境が要求される。しかし、ビーム照射を受ける Li 表面部ではそのエネルギーにより温度が上昇し、適切に除熱しなければ Li は容易に沸騰、その Li 蒸気により周辺雰囲気を乱す原因ともなってしまう。そこで、IFMIF おける液体金属 Li 噴流ターゲットは、図1のように湾曲流路に沿って流すことにより、噴流内部に遠心力による内圧上昇を発生させ、沸騰させる構造の採用が計画されている。

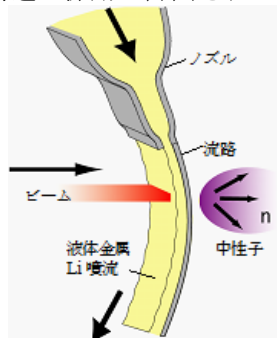


図1 IFMIFにおける液体金属 Li 噴流ターゲットの概念図

### 2. 研究の目的

これまで大阪大学では、EU 共同「国際核融合炉材料照射施設のための工学実証及び工学設計活動(IFMIF Engineering Validation and Engineering Design Activities : IFMIF/EVEDA)」において、液体金属 Li 噴流ターゲットに関する基礎的な研究を一手に担い、大型の液体金属 Li 循環装置を保有・維持し、実

験を行ってきた。過去には液体ナトリウム-カリウム合金(NaK)を用い、環状噴流の磁場下での挙動を調べる研究も実施、噴流表面が安定するという知見も得ている。

これらの知見と保有する施設を基に、本研究では、液体金属 Li 噴流を磁場による制御方法を提案する。湾曲流路を用いた物理制御から、磁場制御に切り替えることで、流路を排除した液体金属噴流ターゲットを考案する。これにより、放射性廃棄物の量を低減可能となる。このように流路を排除することに加え、高真空環境下で沸騰を避けるための湾曲噴流を磁場により形成する方法を実証する。以上のように、磁場による液体金属噴流の革新的制御方法の確立が本研究の目的である。これにより、ビームエネルギーによる流路の損傷等のリスクを排除しつつ、放射性廃棄物を低減、高価な低放射化フェライト鋼の使用を抑制し、低コストで安全、安定な液体金属噴流ターゲットの開発に資することができる。

### 3. 研究の方法

本研究では、磁場による液体金属噴流の制御として、磁気ガイド型液体金属噴流ターゲット(Magnetically Guided Liquid metal Target : MGLT)を提案する。図2に IFMIF 用に検討した MGLT の概念図を示す。MGLT では、ノズル一体型電磁石(Electro-Magnet Integrated with Nozzle : EMIN)を採用、IFMIF などで必要となる高中性子束テストモジュール (High Flux Test Module : HFTM) を用い、磁場を湾曲させる構造となっている。

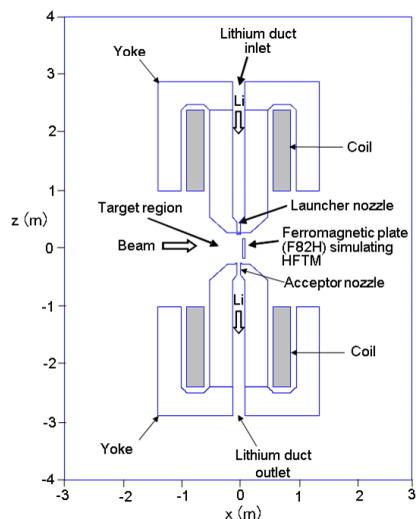


図2 IFMIF用 MGLT 概念図

本研究では、まずシミュレーションによる IFMIF 用 MGLT の性能実証を行う。磁場計算コードには、米ロスアラモス国立研究所から無償で提供されている二次元磁場解析コード Poisson/SuperFish (PSF) を用いる。PSF で磁場を計算した後、運動量方程式を解くことで液体金属噴流の軌道計算を実施する。次に、実証試験に向けた検討を行う。Li は空気中で活性であり、容易に酸化、窒化する。水とも激しく反応し、水素を生成する。更に、Li の

融点は 180[°C]なので、実験は 250~300[°C]で行う必要がある。このように、Li では実験装置が非常に高コストとなってしまう。そこで、代替の液体金属として、液体金属ガリウム(Ga)を考える。表 1 に Li と Ga の物性の比較を示す。ここで、表 1 中の融点を除く物性値は、Li が 250[°C]、Ga が 40[°C]における値を示している。Ga の融点は約 30[°C]とほぼ常温であり、液相を維持することを考慮しても、実験温度は 40[°C]程度で十分である。加えて、Ga は空気中で比較的不活性であり、酸化はするものの、Li に比べると、その反応は遥かに弱く、開放空間での試験も可能である。ただし、表 1 から分かるように、密度や粘性係数、表面張力といった噴流特性に与える影響が大きい物性が大きく異なる。そのため、実験条件の検討、および EMIN の形状最適化が必要となる。そこで、PSF 磁場計算による EMIN 最適化を行う。また、得られた最適磁場を用いた Ga の二次元軌道計算を行い、その成立性の検証 (Li との比較) を行う。最後に、最適化に基づいたループ設計および製作を実施する。

表 1 Li と Ga の物性の比較

	Li (@250°C)	Ga (@40°C)
融点 [°C]	180.55	29.75
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	506.9	6100
粘性係数 [Pa*s]	5.37×10 <sup>-4</sup>	1.89×10 <sup>-3</sup>
表面張力 [N/m]	0.387	0.718
導電率 [S/m]	354.9	367.7

#### 4. 研究成果

##### (1) IFMIF-MGLT 性能実証計算

図 3 に PSF を用いた磁場計算によって得られた図 2 に示した IFMIF-MGLT の磁場ポテンシャル分布を、図 4 に図 3 における噴流部近傍の磁場ポテンシャルの拡大図を示す。このとき、コイルに流れる電流は 125 万[AT]とした。図 3 および 4 を見ると、噴流部の磁場は、HFTM に引き寄せられるように湾曲していることが確認できる。

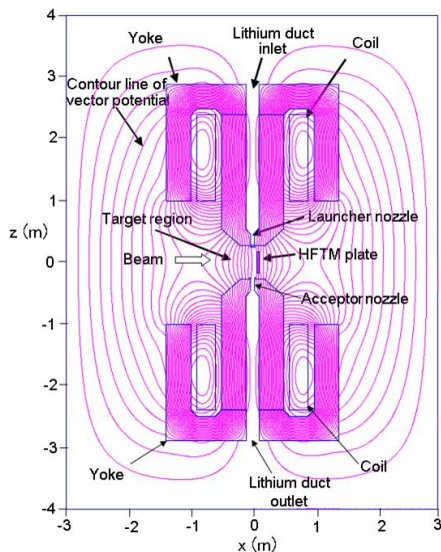


図 3 IFMIF-MGLT の磁場ポテンシャル分布

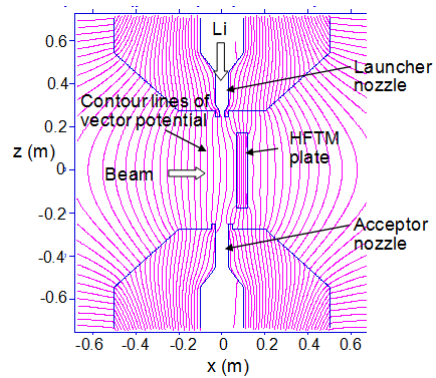


図 4 噴流ターゲット付近の拡大図

図 5 に HFTM がいない場合の噴流ターゲット付近の磁場ポテンシャル分布を示す。HFTM がないと、噴流部における磁場もほぼ対称になってしまう。本 MGLT 概念では、必ず必要となる HFTM を利用することで湾曲磁場を形成している。図 6 に HFTM を用いないで湾曲磁場を形成するための MGLT における磁場ポテンシャル分布を示す。ビーム上流側に強磁性体板を上下に設置することで磁場が湾曲する。ただし、以降は全て HFTM を考慮した場合の MGLT について示していく。

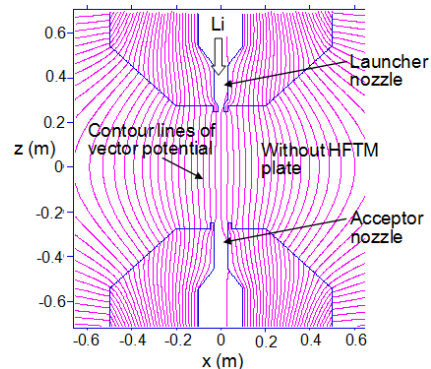


図 5 HFTM がいない場合の噴流ターゲット付近の磁場ポテンシャル分布

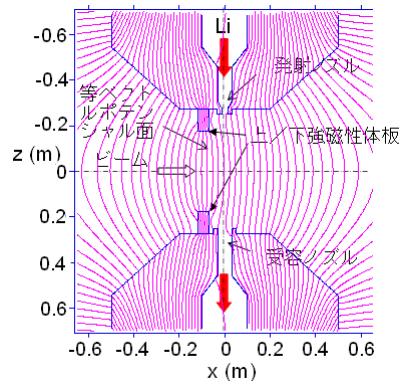


図 6 HFTM を用いない MGLT の磁場ポテンシャル分布

次に、PSF を用いた磁場計算データを基に IFMIF-MGLT における二次元軌道計算を実施した。図 7 に計算体系図を示す。図 7 に示すように、ビームの方向を x 方向、噴流の流れ方向を z 方向とする。

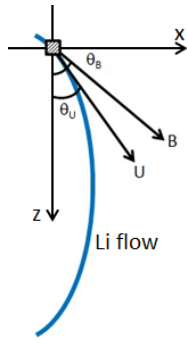


図7 液体金属噴流の二次元軌道計算体系

本計算では、流れは曲率と厚さ、流速、流れの角度で表現される非粘性流れとして考える。流路のない噴流を想定しており、流路との摩擦力の影響は存在しない。また、液体金属内に発生する誘導電流は外部磁場に比べて無視できるほど小さいため、ローレンツ力は外部磁場のみで決まると考えてよい。

図8に計算で得られたLi流線と磁力線の関係を示す。青がLi流線、赤がPSFで計算された磁力線である。図8では上側吐出ノズル出口から下側回収ノズル入口までの計算結果を示している。流れは磁力線に追従する形で湾曲している。

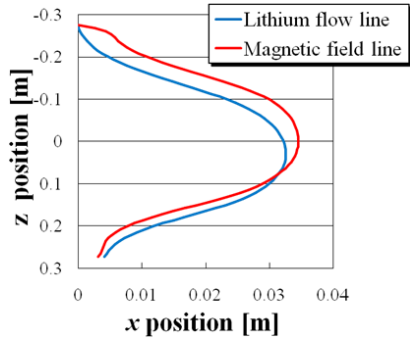


図8 Liの流線と磁力線の関係

IFMIF実機条件を考慮すると、噴流サイズが幅260[mm]、厚さ25[mm]、流速15[m/s]となり、MGLT実験装置も必然的に大きなものが必要となるが、大型装置の製作は困難である。そこで、液体金属Ga試験では、IFMIF実機サイズLi噴流条件と比較可能な条件を検討する必要がある。ここで、湾曲度を表す無次元パラメータとして磁力線に対する液体金属噴流経路の偏差 $D_{ev}$ を定義する。

$$D_{ev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{Li} - x_{Mi})^2}{\sum_{i=1}^N (x_{Mi} - x_{M0})^2}} \quad (4)$$

ここで、 $x_L$ : 液体金属噴流のx座標[m]、 $x_M$ : 磁力線のx座標[m]、であり、 $i$ は任意のz位置、0は吐出ノズル出口、Nは回収ノズル入口を表している。図9に任意の噴流経路および磁力線に対する $x_L$ 、 $x_M$ の概念を示している。噴流経路をz方向にNで分割、それぞれのz座標における $x_L$ と $x_M$ を求め、式(4)から偏差 $D_{ev}$ を計算する。

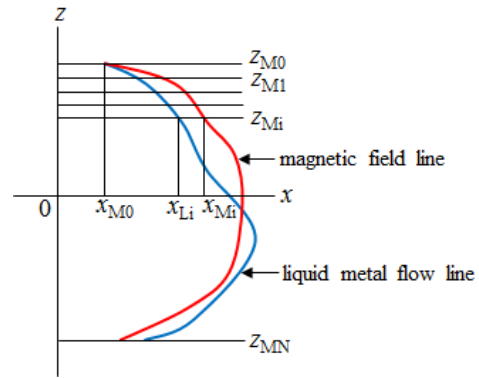


図9  $D_{ev}$ 計算における変数の定義

また、噴流条件を示すパラメータとして、次式で定義される相互作用係数 $N$ を用いる。

$$N = \frac{\sigma B^2 L}{\rho U} \quad (5)$$

ここで、 $L$ : 代表長さ[m]、である。 $N$ は、慣性力と電磁力の比を表す無次元数で、磁場が流動場に与える影響を表す無次元数である。つまり、 $N$ が大きいほど流動場は磁場によって変化させられることを意味する。 $L$ の代表長さに噴流サイズを表す長さを用いる。

図10に相互作用係数 $N$ と湾曲度を表す偏差 $D_{ev}$ の関係を示す。図10中には、Liだけでなく、代替液体金属であるGa、NaKについてのデータも示している。Liのフルスケールとは図2で示したIFMIF-MGLTを、GaとNaKの1/5スケールとは実験用にサイズを小さくしたMGLTを意味する。図10より、Li、Ga、NaK全てが一つの曲線上にあることが分かる。つまり、湾曲度は $N$ にのみ依存し、その $N$ を変えることで様々なスケールの模擬実験が可能である。

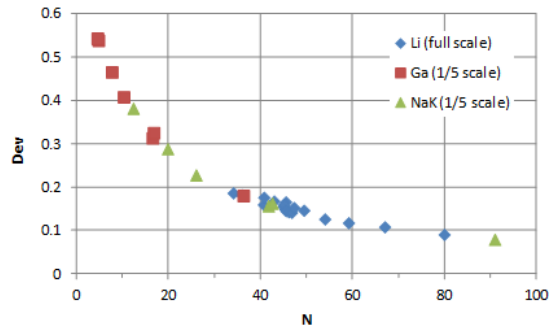
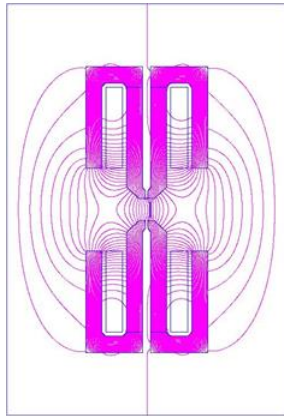


図10 相互作用係数と偏差の関係

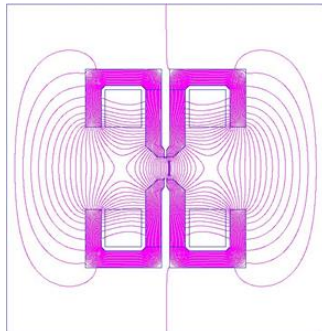
## (2) Ga 実験用 EMIN 形状最適化

図10の $D_{ev}$ が大きいということは磁力線と噴流経路のずれが大きいことを意味する。Gaでの実験を考えた場合、Gaは密度が大きいため、どうしても慣性力の影響が強くなってしまい、 $N$ は小さくならざるを得ず、ずれも大きくなる。図10より、IFMIF実機条件との比較では $D_{ev} < 0.2$ 、 $N > 35$ であることが望まれる。図10の計算では、図2で示されるIFMIF-MGLTをそのまま縮小した(1/5スケール)MGLTを考えたが、Ga実験用にEMINのサイズと形状の最適化を実施する。

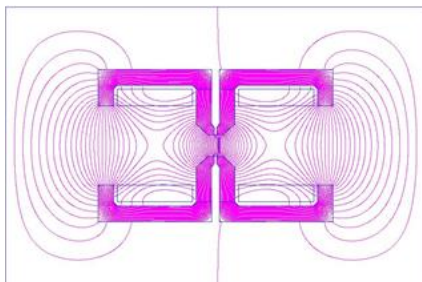
図 10 の計算のように IFMIF-MGLT から 1/5 スケールとした上で、形状（アスペクト比）を変えて磁場計算を実施し、形状の効果を検証した。図 11(a)~(c)にそれぞれ 1/5 スケールモデル（アスペクト比 1:5）、正方形モデル（アスペクト比 1:1）、横長方形モデル（アスペクト比 5:1）の磁場ポテンシャル分布を示す。ただし、それぞれの形状において、コイルの断面積（電流[AT]の大きさ）は同じとしている。表 2 に各モデルの噴流部中心における磁束密度の比較を示す。表 2 から分かるように、横長方形モデルが最も磁場が強くなる。このように、同じ電流でも鉄心断面のアスペクト比を変えることで磁場を強くでき、 $N$  を大きくすることができる。



(a) 1/5 スケールモデル（アスペクト比 1:5）



(b) 正方形モデル（アスペクト比 1:1）



(c) 横長方形モデル（アスペクト比 5:1）

図 11 MGLT の磁場ポテンシャル分布

表 2 各モデルの磁束密度の比較

モデル	鉄心断面積 [cm <sup>2</sup> ]	噴流部中心における磁束密度 [T]
1/5	1000	0.38
正方形	740	0.55
横長方形	750	0.68

図 11 の計算により横長方形モデルで磁場を強くできることは確認したが、更なる小電源化や物量（鉄心重量）低減のため、コイル断面積、周辺構造も含め最適化を実施する。

図 12 に、Ga 実験用に最適化した MGLT における磁場ポテンシャル分布を示す。IFMIF 実機では MGLT の左側から噴流中心に向かってビームが走るため開けているが、実証実験では上下鉄心が外側でつながっていても問題ない。そこで、Ga-MGLT では限られたスペースで磁場をより強くするため、図 15 のように鉄心の両側をつなげることで磁場のリターンパスを設けた。結果として、噴流部中心で磁束密度 0.86[T]を得られた。このとき、Ga 噴流速度を Ga のインベントリ (40[L]) から計算し、得られた磁場強度で  $N$  を計算すると約 45 となった。Ga-MGLT で要求条件を得ることが可能であることを確認した。

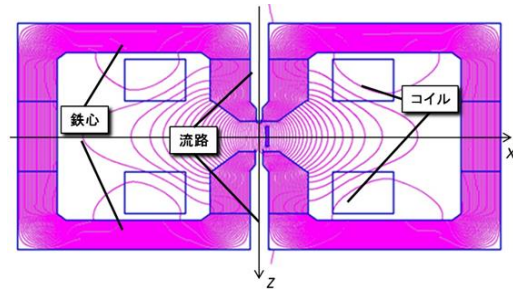


図 12 Ga-MGLT の磁場ポテンシャル分布

### (3) Ga-MGLT 性能実証計算

図 13 に Ga の流線と磁力線の関係を示す。図 13 より、最適化した Ga-MGLT で Ga 噴流が磁力線に沿って湾曲することが確認できた。ただし、図 8 の Li の場合と比較すると、Li で  $N$  は約 42 であり、それより大きい  $N$  を持つ Ga 噴流の方が、磁力線と流線の頂点の差が大きいが、これは重力の影響によるものである。

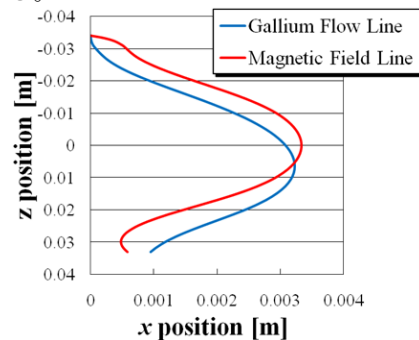


図 13 Ga の流線と磁力線の関係

### (4) Ga 試験ループ設計および製作

図 14 に最適化された Ga-MGLT の設計概略図を示す。コイルはトラック状に巻かれた形状とした。図 15 に実際に製作した鉄心を示す。また、上下鉄心間をつなぐリターンパス用鉄心は別に製作し、乗せるだけの構造とした。図 16 に製作したコイルを示す。コイルには直径 3.2[mm]の銅線を用い、コイル容器の中で巻かれている。コイル容器は、コイルを冷却するための液化窒素の受皿の機能も

持っている。コイルの巻き数は 650 ターン、これで 0.86[AT]を実現できる。本実験では 40[A]として 26,000[AT]となる。

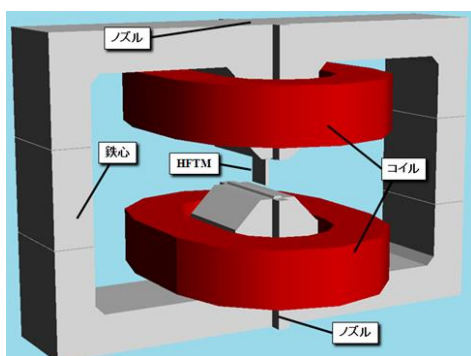


図 14 Ga 実験用 MGLT の設計概略図



図 15 製作した鉄心

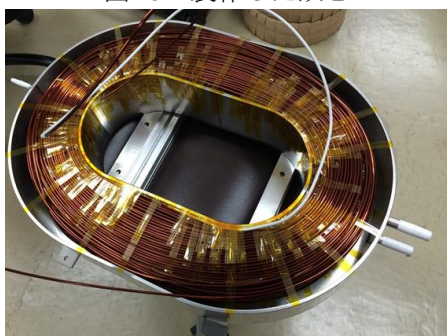


図 16 製作したコイル

作成した鉄心およびコイルは総重量が 400[kg]を超える。そこで、これら MGLT を支えるための架台、および MGLT 固定用アルミフレームを製作した。架台は磁場に影響を及ぼさない非磁性体として SUS304 にて製作、アルミも同じ非磁性体である。

以上を踏まえた上で、全体ループ設計を実施した。図 17 に Ga 試験ループ概要を示す Ga 試験ループ空間配置図を示す。Ga 試験ループでは、ガスブローダウン方式を採用している。当研究室が保有している Ga タンクに加え、同じく別の実験にて使用していたタンクを用いたチャージ・ドレイン方式とした。ドレインタンクにある Ga をガス圧によりチャージタンクに上げる。チャージタンクは地面より 2[m]の高さに設置されており、1.5[m]の高さにある MGLT に同じくガス圧にて Ga を流し込む。回収された Ga は再びドレインタンクに戻されるという流れとなる。以上のように、これまでの最適化、実証計算を経て設計された MGLT を組み込んだ Ga 試験ループの設計・製作を完了した。

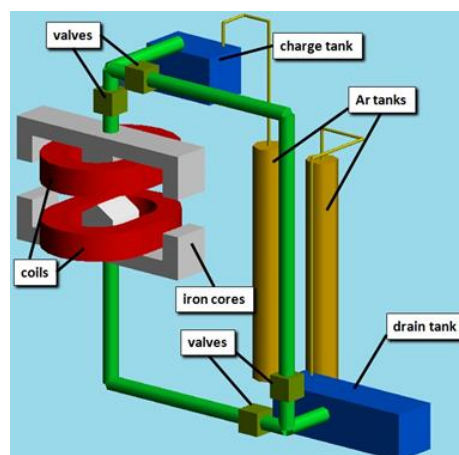


図 28 Ga 試験ループ空間配置図

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1) H.Kimura, E.Hoashi, “Concept of curved magnetically guided liquid lithium target without a back plate for IFMIF”, Fusion Engineering and Design, Volume 88, No.5, pp327-340, 2013.

[学会発表] (計 1 件)

1) 木村晴行、帆足英二、“強力中性子源のための背面壁を有さない湾曲型磁気ガイド液体リチウムターゲットの提案”、日本原子力学会 2013 年春の年会、K01、近畿大学、2013.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称：液体金属ターゲット、中性子発生装置及びその制御方法

発明者：木村晴行、帆足英二

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：公開特許公報 (A)

番号：特開 2014-220033

出願年月日：2013 年 5 月 1 日

取得年月日：2014 年 11 月 20 日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

帆足 英二 (EIJI HOASHI)

大阪大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40520698

(2) 研究分担者

堀池 寛 (HIROSHI HORIIKE)

大阪大学大学院工学研究科・教授

研究者番号：20252611

木村 晴行 (HARUYUKI KIMURA)

大阪大学大学院工学研究科・招聘教授

研究者番号：20343915

鈴木 幸子 (SACHIKO SUZUKI)

大阪大学大学院工学研究科・助教

研究者番号：20403157

山岡 信夫 (NOBUO YAMAOKA)

大阪大学大学院工学研究科・嘱託技術職員

研究者番号：80444561