

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06999

研究課題名(和文)高温超伝導リニアカタパルトを用いた超高速ペレット入射装置の開発研究

研究課題名(英文) Development of super-high-speed pellet injection system using high-temperature superconducting linear catapult

研究代表者

柳 長門 (Yanagi, Nagato)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：70230258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め方式核融合炉の燃料ペレット供給のための新方法としてリニアカタパルト方式を考案し、原理検証実験と数値シミュレーションを行った。実験では、永久磁石を敷き詰めたレール上で磁気浮上させた高温超伝導体を電磁石によって加速するシステムを構築した。電磁石に通電するタイミングをレーザー・光センサと高速スイッチング回路で制御することで、長時間に及ぶ安定な連続加速を実現した。数値解析では、電磁石による磁場印加で高温超伝導体に誘起される磁気遮蔽電流を軸対称モデルで計算した。これによる電磁加速で得られる速度を多段連続加速の場合まで求めた結果、1 kmの加速区間で1 km/sの速度が得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込め方式核融合炉の燃料ペレット供給のための新方法として高温超伝導リニアカタパルト方式を考案し、原理検証実験と数値シミュレーションを行った。これにより、今後の本格的開発によってこの射出方式が実際に適用できる可能性を見出すことができ、これにより将来の核融合炉プラズマの運転制御を容易にすることが期待される。また、この小型リニアカタパルトシステムは核融合炉だけでなく、他の工業用途にも適用できる可能性があり、高温超伝導の用途を広げる意味でも意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：A new pellet injection method using the superconducting linear catapult is proposed for fueling of a fusion reactor, and a proof-of-principal experiment as well as numerical simulations have been carried out. In the experiment, a miniature train having a high-temperature superconducting bulk was cooled by liquid nitrogen, and magnetically levitated above a railway consisting of neodymium magnets. The train was then accelerated using electromagnet coils placed along the railway. The timing for energizing the magnets was precisely determined by detecting the train's position using a laser and an optical sensor with a control unit having a microprocessor and a IGBT switching circuit. The numerical simulation calculates the induced shielding current by applying magnetic field using the electromagnets, and the resultant electromagnetic force is calculated for acceleration. The result suggests that a 1 km/s of speed is obtained with a 1 km acceleration with a continuous acceleration.

研究分野：超伝導工学

キーワード：磁気浮上 高温超伝導 リニアカタパルト ペレット

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め方式の核融合炉では、燃料供給を行うために、水素同位体を極低温で凍らせた 1-2 mm のペレットを高速で射出してプラズマに入射する。現在までのところ、圧縮した水素ガスを用いてエアガン方式でペレットを射出する技術が開発されてきたが、得られる速度は 1 km/s 程度が限界である。このため、ペレットは高温プラズマの周辺部に入ったところで溶発してしまい中心まで届かず、燃料供給効率が悪い。また、核融合炉ではペレットを高繰り返しレートで長時間に渡って連続的に打ち続ける必要があるが、現状のシステムでは数十個程度の「弾」を「連発空気銃のリボルバー」にあらかじめ込めて打つ方式が運用されている段階であり、今後の拡張は容易ではない。そこで、全くの別方式として、電磁加速が想定され、本研究ではリニアカタパルト方式について検討を行うこととした。

## 2. 研究の目的

上記のとおり、磁場閉じ込め核融合炉の燃料供給に用いるペレットの射出方法として新しくリニアカタパルト方式を考案した。これは、高温超伝導物質を磁気浮上させ、それを直線状に並べた電磁石によって加速する方式である。具体的には、以下の手順となる。まず超小型の「列車」に高温超伝導物質を搭載し、それを極低温に冷やすことで超伝導状態とする。これにより、永久磁石を敷き詰めた直線レールの上で磁気浮上させることができる。レールに沿ってソレノイド形状の電磁石コイルを並べておき、列車が通過するタイミングに合わせて個々の電磁石に通電することによって高温超伝導物質に磁気遮蔽電流を誘起し、その電流と電磁石で印加された磁場との間で働く電磁力によって列車を加速するものである。レール全体は真空チューブの中に入れるため空気との摩擦がなく、列車を加速して超高速にすることが原理的に可能である。実際、加速部に存在する重水素と三重水素の混合ガスによる抗力（空力抵抗）について概算すると、核融合炉で想定される周辺部の中性粒子圧力 0.5 Pa ではペレット速度 10 km/s においても推進力と比べて百万分の 1 程度となり、全く問題にならない。

この原理を用いたリニアカタパルトによるペレット加速の概念図を図 1 に示す。初期的な計算により、加速部の長さが 100 m あれば最終速度として 10 km/s に到達できると試算した。これは、以前に核融合科学研究所（NIFS）の広報用に開発した高温超伝導磁気浮上列車の模型において最高 10 m/s の加速を実現したことより、(1) バルク材の代わりに超伝導薄膜を用いて重量を 10 分の 1 に下げる（アイスペレット約 1 g も搭載）、(2) 絶対温度 4 K で冷却することにより液体窒素を用いた温度 77 K における冷却と比べて超伝導臨界電流密度を 100 倍にする、(3) 加速用電磁石を超伝導とすることで電流を 100 倍にする、(4) レールの単位長さあたりに設置する電磁石の数を 5 倍にする、(5) レール全体を真空チューブに入れる、などの要因を入れた結果である。

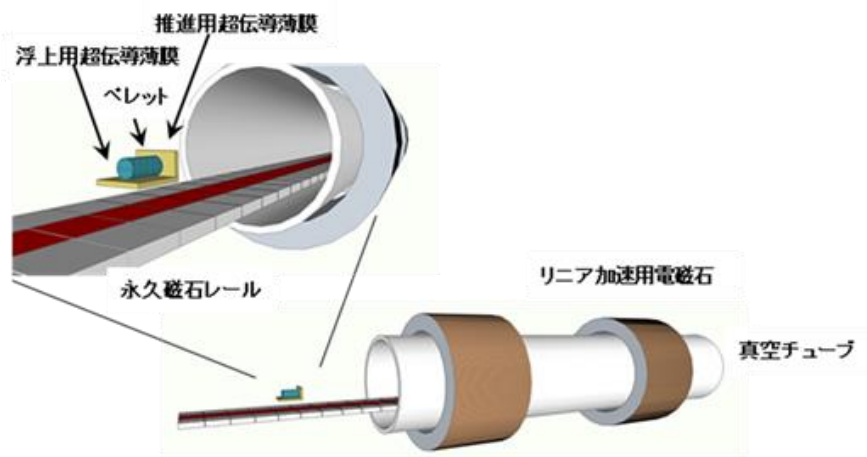


図 1. 核融合燃料ペレットのリニアカタパルトを用いた加速法式の概念図

将来の開発によって実際にこの速度が実現できれば、燃料ペレットを核融合プラズマの中心付近まで到達させることが可能となるため、核融合燃焼効率が増大し、燃焼制御も大幅に楽になる。よって、放射性物質である三重水素の炉内における保持量も低減できる。また、リニア駆動方式では一列に並べた多数の「列車」にペレットを載せて順次射出していき、すべての「列車」はプラズマに入る前に電磁ブレーキを用いて回収して再利用するため、連続的な運用が可能であり、燃料供給システムをトータルに完成できる見通しも立つ。そこで、本研究では、実験と数値解析によって、この超伝導リニアカタパルト電磁加速方式について原理検証を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、磁場閉じ込め核融合炉の燃料ペレットの超高速射出への応用をめざして、超伝導リニアカタパルト方式の電磁加速について原理検証を行った。まず実験研究を行うにあたり、以下を製作した。高温超伝導小型磁気浮上列車、永久磁石を並べた直線および円形レール、電磁石コイル、電源・スイッチング回路、自動制御装置（レーザとフォトダイオードセンサ、および、マイコンによる制御）。まず、磁気浮上列車（模型）に REBCO 系高温超伝導バルク材を搭載した。軟鉄製のレールには、ネオジム磁石を 3 個で 1 ユニットとなるよう S-N-S 極の順に敷き詰めた。磁気浮上列車を液体窒素で冷却することによって超伝導状態とし、レール上で磁気浮上させた。

次に、レールに沿って並べ電磁加速を行うための電磁石については、合計 12 個を製作した。電磁石は、銅線（直径 0.8 mm）を約 1000 ターン（8 個分）、および、約 100 ターン（4 個分）巻いたソレノイドコイルであり、パルス的に電流（定格 10 A）を通电することで磁気浮上列車に搭載した高温超伝導バルク材に磁気遮蔽電流を誘起した。この電磁加速は、磁場勾配の急峻な部分で生じる点が重要であり、トンネル状の電磁石コイルでは磁場勾配は入口・出口の境界部分で生じるため、磁気浮上列車がちょうどこの部分に来たところでタイミングよく電流を流す必要がある。タイミングがこれより遅いと加速が弱くなる一方、タイミングが早過ぎると逆にブレーキがかかってしまう。速度が速くなるとこの制御は手動では難しくなるため、自動制御システムを構築した。これには、まずレーザ発信器とフォトダイオードセンサ受光部のセットにより列車の通過を検出し、その信号を速度評価型 TTL 発生装置（マイコン）にインプットすることで列車の位置と速度の両方の情報を得た。そのアウトプットを用いて各電磁石に通电するための半導体 IGBT 素子を用いた高速スイッチング回路を駆動した。列車の位置と速度を正確に計測してタイミングよく通电を行う必要があるため、最初に直線レールで多段加速の試験を行い、制御系の改良に進めた。結果、最終的に円形レールで連続加速試験を行った。これをもとに、最終的に、円形レールで連続的に加速を繰り返し、長時間の走行実験を行った。製作を完了した直線型加速試験装置、および、円形連続加速試験装置の全景を図 2 に示す。

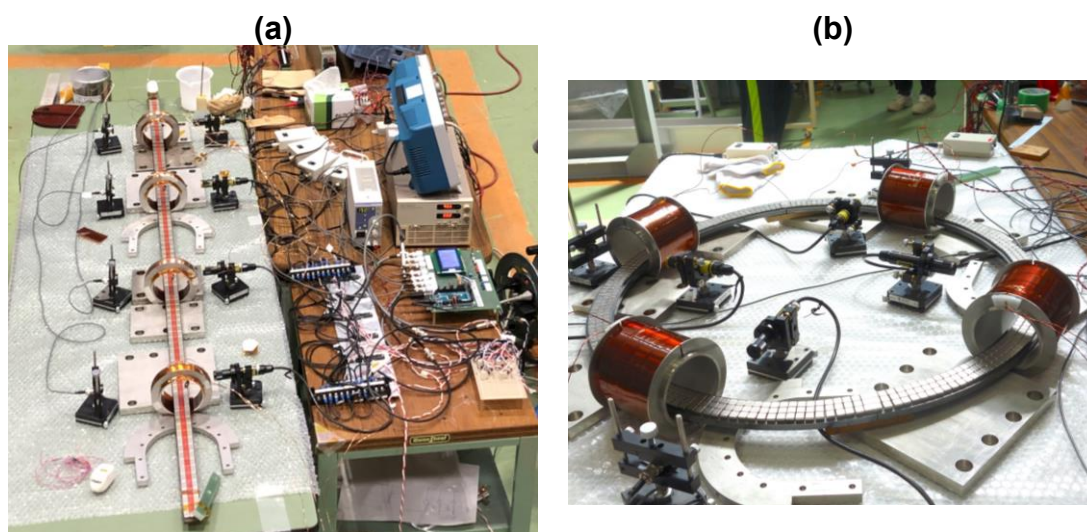


図 2. (a) 直線型加速試験装置、および、(b) 円形連続加速試験装置の全景

本研究では、上述の実験研究と並行して、数値解析研究を行い、高温超伝導薄膜に誘起される磁気遮蔽電流の空間分布・時間変化のシミュレーションにより、期待される電磁加速について検討を進めた。現行の解析では、高温超伝導バルク材には軸対称モデルを適用した。これは、軸対称が仮定できればより一般的な体系に対して有効な有限要素法に比べて計算時間を短くできるためである。外部の電磁石による磁場変化に伴い高温超伝導体に誘起される磁気遮蔽電流を解き、これと磁場との相互作用による電磁力を計算して加速を評価した。最初は1個の電磁石による1回の加速だけを評価し、その後、複数の電磁石を用いて連続的加速する場合も扱えるようにした。高温超伝導バルク材は推進用に鉛直方向に入れたものを円形と仮定して、軸対称モデルを適用した。実際のシステムでは磁気浮上用のバルク材（水平方向）もあるが、これは無視した。電磁石は断面を70分割として、各フィラメントの電流を個別に与えられるようにし、その電流分布について最適化も行えるようにした。

#### 4. 研究成果

本研究課題の実験研究として、高温超伝導磁気浮上列車を用いたリニアカタパルト方式による電磁加速試験装置を構築した。最初に直線レールに沿って4段の電磁石コイルを用いた連続加速試験を行った。マイコンを用いたタイミング回路の調整を行い、スムーズな加速を行うことができた。この直線レールの場合、一方向への加速で一回だけで終わってしまうので、次にこれを円形レールとして、さらなる改良を行った。その最終結果として約2分間の連続走行を達成した。時間の上限は液体窒素の保持時間で決まったものである。今回製作した円形レールは平面状としたため、磁気浮上列車の走行時に、当初、遠心力によって列車の姿勢が傾き、不安定となった。そこで、車体自体をあらかじめバンクさせておくことにより、遠心力による不安定性発生を軽減に成功した。このことも安定した長時間の連続加速を可能にした要因である。これにより、連続した電磁石コイルを用いた自動電磁加速に成功した。ここでは、レーザ・光センサを用いて列車の位置と速度を検出し、それをもとに電磁石に通電するタイミングを決めて連続加速を行っている。しかしながら、このシステムを実際のペレット入射装置に適用することを考えると、レール全体を真空チューブに収納することになるため、レーザ・光センサの適用は困難である。そこで、これに代わる位置と速度の検出方法を採用することが求められる。そのひとつとして、ここでは、ホール素子を用いる方法を考案した。これは、磁気浮上列車に搭載した高温超伝導バルク材に磁気遮蔽電流が流れ、それによって磁場が発生するため、その磁場をホール素子によって計測することで列車の通過を検出するというものである。ここで、ホール素子は極低温で使用する薄型のもの（BHT-921）があり、それをレールの上に貼り付けて使用することで局所的な計測で真空チューブ中のレール装着可能である。ただし、レールにはネオジム永久磁石が並べてあり、ホール素子はそのゼロ次磁場をまず拾うため、出力信号からこれを差し引き、列車に搭載したバルク材が作る磁場のみを用いるようにした。まずは、ホール素子によって得られる位置情報について、併用したレーザ・光センサによる位置情報と比較を行った。ホール素子を用いて計測した速度と、フォトダイオードを用いて計測した速度の間に相関関係が見られたので、ホール素子はフォトダイオードと同じように、列車の速度の計測に用いることができると考えられる。しかし、今回使用したホール素子は液体窒素の冷気により、ホール素子の計測値が不安定になる現象が見られた。実際の適用に当たっては、液体窒素は使わないこと、真空中であること、を考えると、この冷気の問題はないと判断できる。

本研究課題では、実験研究と並行して超伝導磁気浮上リニアカタパルトによる電磁加速について数値解析による検討を進めた。上述のとおり用意のもと、回路方程式と運動方程式の初期値問題を解くことによって、電磁加速によって得られる速度を求めた。その結果、まず単一の電磁石を用いた場合の結果を得た。その例では、電磁石の断面における電流分布を一葉とした場合は37 m/sの速度となり、電流分布を最適化した場合は46 m/sまで向上した。この結果より一段の電磁加速によって得られる速度はこの程度のものとはなるが、これを多段にすることによって最終到達速度をどこまで上げられるかが課題となる。そこで、多段にした場合の計算を行い、加速時間に対して得られる最終速度、および、必要な距離を求めた。結果を図3に示す。これにより、例えば、2秒程度で1 km/sの最終速度を得ることができているが、この間に1 km以上の距離を通過している。この結果は、10 km/sの最終速度を得るにはもっとはるかに長い距離を要し、現実的ではないことを意味している。よって、このシステムでは、到達速度として1 km/s程度に留まることになる。これは現状

のエアガン方式でも達成可能な速度領域であり、できればもっと高速までもっていきたい。ひとつの方策として高温超伝導薄膜に誘起される磁気遮蔽電流を増大させる手が考えられる。これには、高温超伝導薄膜をあらかじめフィールドクーリングすることが有効である。これを考慮した数値解析も行った。この場合は、あらかじめ 3 T の磁場を高温超伝導薄膜に印加しておき、それを消磁することで高温超伝導薄膜に磁気遮蔽電流を最初から誘起するものである。この状態において加速用電磁石から磁場を印加すると、磁気遮蔽電流の値が大きいため、より大きな電磁力、すなわち、加速を得ることができると期待される。このモデルを用いて実際に数値解析を行った結果、フィールドクーリングを行った場合、たしかに同じ時刻においては速度の向上が見られる。ただし、これに至る距離を比べるとフィールドクーリングなしの場合とほぼ同等となっていた。よって、必要な加速距離は変わらない。

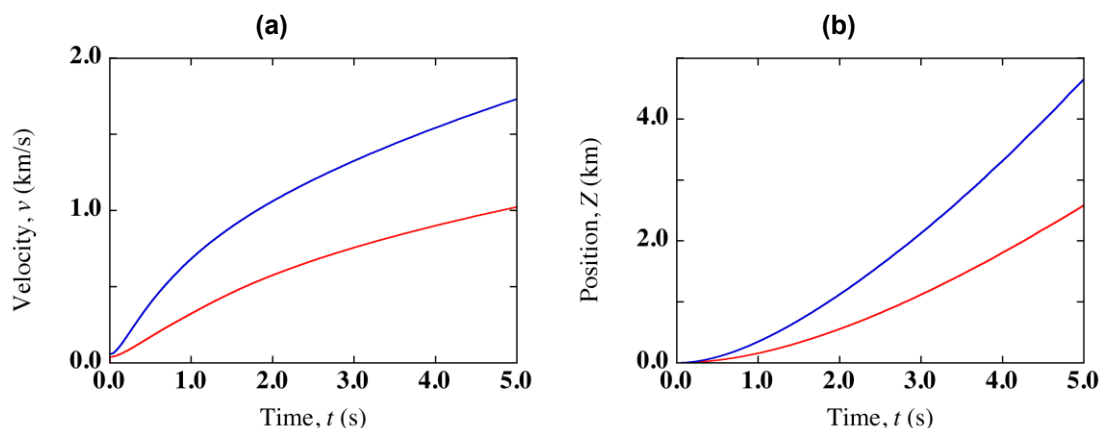


図 3. 多段加速した場合に得られる (a) 速度と加速時間との関係、(b) 位置と加速時間との関係 (赤：電磁石の断面内電流が一樣の場合、青：断面内電流を最適化した場合)

本研究課題における実験研究により超伝導リニアカタパルト方式による連続電磁加速について原理検証を行うことができた。特に、円形加速方式を用いた場合、最高 2 分間の連続加速に成功した。また、数値解析研究を行うことで、速度 1 km/s を得るためには加速区間として 1 km 程度を設ける必要のあることが分かった。当初期待した 10 km/s の速度を得るには数十 km に及ぶ加速区間が必要であることも分かり、これは現実的ではないと判断される。実際に核融合炉に適用することを考える場合、当初は 100 m 程度の加速区間となることを期待したが、それでは 1 km/s の速度を得ることは難しい。加速区間を 1 km とする場合、放射線管理区域を伸ばすことなどの議論は伴うが、非現実的というわけでもない。リニアカタパルト方式による加速では連続したペレット注入も可能であると考えられ、今後、エアガン方式と並行して開発を進めていくことには意義があると考えられる。この方式に関する次のフェーズの開発研究としては、10 m 程度のルールと連続した電磁加速システムを製作し、全体を真空チューブに入れた加速を行い、速度 100 m/s に到達させることと考えられる。一方、磁気浮上列車を電磁加速する際に励磁電圧には制限があるため、励磁には必ず有限の時間がかかる。よって、遅れ時間をあらかじめ見積もって電磁石を順次スイッチングしていく必要があり、最適なタイミングを見つけることが重要となる。すなわち、フィードバック制御は、高速になるにつれて難しくなる。そこで、高速領域では制御を変更して、あらかじめ最適化したタイミングで電磁石を順次動作させることによって磁場の波を作り、その波に超伝導体をサーフィンのように載せて加速していく方式が有効になると考えられる。この制御の実現性を実験的に示すことも、次のフェーズの開発課題となる。さらに、比較的低速の 100 m/s 程度で精度の高い速度制御を伴った電磁加速の開発を行うことも重要なテーマとして提案できる。これは、本研究課題で構築したレーザ・光センサを用いたタイミング制御による電磁加速システムにおいて、さらにタイミング制御を正確に行うべくマイコンの設定を改良するとともに、計測精度を上げた実験を行うことで対応が可能である。これは、例えば、慣性 (レーザ) 核融合のターゲットの移送 (標的点への射出) 等に適用することが考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh, Atsushi Kamitani, Hiroaki Nakamura	4. 巻 14
2. 論文標題 FEM Simulation of Axisymmetric Pellet Injection System Using HTS Linear Acceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401077
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.14.3401077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Teruou Takayama, Atsushi Kamitani, Gen Motojima, Nagato Yanagi
2. 発表標題 Numerical Investigation on Pellet Acceleration System by Using High-Temperature Superconducting Film
3. 学会等名 The 26th International Toki Conference & The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference（国際学会）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	本島 厳  (Motojima Gen)  (00509507)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授   (63902)	
研究分担者	高山 彰優  (Takayama Teruou)  (70396589)	山形大学・大学院理工学研究科・准教授   (11501)	~ 2018.5.31

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------