C

JAEA-Technology 2019-022 DOI:10.11484/jaea-technology-2019-022



新型コロナプローブの開発

Development of New Corona Probe

中村 暢彦 沓掛 健一 松田 誠

Masahiko NAKAMURA, Kenichi KUTSUKAKE and Makoto MATSUDA

原子力科学研究部門 原子力科学研究所 研究炉加速器技術部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research

March 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2020

JAEA-Technology 2019-022

新型コロナプローブの開発

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門

原子力科学研究所 研究炉加速器技術部

中村 暢彦、沓掛 健一、松田 誠

(2019年12月13日受理)

タンデム加速器(静電加速器)は、発生する電圧を制御することによって、連続した任意 のエネルギーのイオンビームを容易に得ることができるという利点を持っている。したが って、当施設の加速器制御システムで運用しているスケーリング運転と連動制御を用いて、 発生する電圧の制御を自動化することできれば、ビームエネルギーの制御も自動化できる。

電圧制御を自動化するためには開発を進めるべき要素がいくつかある。重要な要素の1つ として、タンデム加速器の電圧を制御しているコロナプローブの位置調整を自動化しなけ ればならない。しかしながら、旧型のコロナプローブでは、制御方法や精度の面で、自動化 することは困難であった。

そこで、我々はこれらの面を改良した新たなコロナプローブを開発した。新型コロナプロ ーブは新たな制御方法、駆動機構および位置検出機構を用いることで、位置調整の自動化、 位置精度の向上、整備性の向上を達成することができた。本報告では、この新型コロナプロ ーブの開発について詳細に述べる。

JAEA-Technology 2019-022

Development of New Corona Probe

Masahiko NAKAMURA, Kenichi KUTSUKAKE and Makoto MATSUDA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 13, 2019)

The Japan Atomic Energy Agency (JAEA) Tokai tandem accelerator (an electrostatic accelerator) has the advantage that it can accelerate an ion beam with proportional energy to its acceleration voltage. Therefore, the control of an ion beam energy can be automated when the control of the acceleration voltage can be automated by using the scaling operation method: an electromagnetics proportional control of optical device parameters, and the ganged control method: a synchronized control of related devices. These methods are operated in the JAEA Tokai tandem accelerator control system.

We should improve several devices to achieve the automatic control of the acceleration voltage. Especially, the positioning system of the corona probe which adjusts the acceleration voltage had to be automated. However, the original corona probe was difficult to be applied to the automatic positioning by its poor control system and low positioning precision.

We have developed the new corona probe which improved defects of the original one. The new corona probe has an automatic and high precision positioning and enhanced maintainability by new control system, new driven system and new position detection system. We describe about the development of the new corona probe in detail.

Keywords: Tandem Accelerator, Corona Probe, Control System

目次

1.	はじ	じめに	5	-
1	.1.	東海	毎タンデム加速器1	_
1	.2.	新型	リコロナプローブの開発目的2)
1	.3.	電圧	E制御3	3
	1.3.	1.	高電圧端子への電圧印加	}
	1.3.	2.	コロナプローブの役割4	ŀ
	1.3.	3.	TPS システムによる安定化	F
1	.4.	旧型	リコロナプローブの問題点6	;
2.	新型	リコロ	ュナプローブの開発	3
2	.1.	構造	5及び改良点	3
	2.1.	1.	位置調整の自動化)
	2.1.	2.	位置精度の向上および位置の再現性の保証)
	2.1.	3.	整備性の向上)
	2.1.	4.	ガス漏れ対策10)
	2.1.	5.	サージ対策11	-
	2.1.	6.	地震対策12	2
3.	新型	120	1ナプローブの制御13	}
3	.1.	制御	■方法13	}
3	.2.	制御	『 モジュール14	F
4.	新型	リコロ	コナプローブの動作16	;
4	.1.	動作	≡試験16	;
4	.2.	旧型	と新型の比較	7
4	.3.	動作	≡試験における不具合と対策17	7
	4.3.	1.	絶縁不良17	7
	4.3.	2.	動作中の揺れ19)
5.	まと	めと	: 今後)

5
,

1.	Introduction	$\cdot 1$
	1.1 Tokai Tandem Accelerator	$\cdot 1$
	1.2 Motivation ······	$\cdot 2$
	1.3 Voltage Control ·····	$\cdot 3$
	1.3.1 Voltage Application to High Voltage Terminal	•3
	1.3.2 Corona Probe ·····	$\cdot 4$
	1.3.3 TPS (Terminal Potential Stabilizer)	$\cdot 4$
	1.4 Problem of Original Corona Probe ······	·6
2.	Development ·····	$\cdot 8$
	2.1 Structure and Improvement ·····	$\cdot 8$
	2.1.1 Automatic Positioning	·9
	2.1.2 Enhanced Precision and Reproducibility of Positioning	·9
	2.1.3 Enhanced Maintainability	·9
	2.1.4 Security Measure for Gas Leakage	10
	2.1.5 Serge Protection ·····	11
	2.1.6 Security Measure for Earthquake	12
3.	Control System ·····	13
	3.1 Method ·····	13
	3.2 Module ·····	14
4.	Operation	16
	4.1 Testing	16
	4.2 Comparison of New Corona Probe and Old Corona Probe	17
	4.3 Defect in Testing and Measure	17
	4.3.1 Insulation Failure	17
	4.3.2 Vibration in Operation	19
5.	Conclusion ······	20

表リスト

表 1	高電圧端子に流れる電流の安定度と電流値の例	5
表 2	新型コロナプローブの制御データ(一部)	13
表 3	モジュール間の通信規格と通信速度	14
表 4	旧型コロナプローブと新型コロナプローブの比較	17
表 5	モーター停止条件(許容値)の変更前と変更後の値	19

図リスト

1 電圧の印加と安定化の仕組み3	図 1
2 旧型コロナプローブの構造	図 2
3 新型コロナプローブの構造	図 3
4 マルチコンタクトの挿入場所11	図 4
5 制御モジュールと配線	図 5
6 高電圧端子電圧: 5MV, 10MV, 15MV におけるコロナプローブの位置と電流16	図 6

写真リスト

写真 1	シャフト摺動部	.10
写真 2	マルチコンタクト(左)とシールフランジ(右)	. 11
写真 3	加速器タンクに固定された新型コロナプローブ	.12
写真 4	新型コロナプローブの制御画面	.13
写真 5	絶縁不良対策後の鉄製カバーと高電圧ケーブル	.18

This is a blank page.

1. はじめに

1.1. 東海タンデム加速器

東海タンデム加速器は、二段加速(タンデム)式のヴァン・デ・グラーフ型静電加 速器である。静電加速器は、その発生できる電圧の限界から得られるビームエネルギ ーに上限はあるが、原理的にはどのような元素もイオン化できれば静電場によって加 速でき、直流のイオンビームとして利用できる。また、その発生する電圧を制御する ことで連続した任意のエネルギーのビームを容易に得ることができるという長所を 持っている。

東海タンデム加速器は、これまで水素からビスマスまで多くのイオンビームを加速 しており、約50元素のイオンビームを実験利用者に提供してきた。静電加速器であ るため得られるビームのエネルギー安定度は高く、それは高電圧端子電圧の安定度に 依存する。高電圧端子電圧は、加速したビームのエネルギーを偏向電磁石によって分 析し、フィードバックをかけて制御することによって高い安定度を得ている。したが って高精度なエネルギーのイオンビームを安定に加速するためには、高電圧端子電圧 を精度良く、制御しなければならない。

一方で、加速器制御システムは、イオンビームの軌道(ビームエンベロープ)はそ のままに、イオンビームのエネルギー、質量及び価数の違いからビーム光学機器のパ ラメータを比例計算によって算出し変更することで、別のイオンビームを簡単に加速 することが可能となっている。光学パラメータのスケーリング則にのっとった運転で あることからスケーリング運転と呼んでいる。現在のスケーリング運転は、一旦、光 学機器のパラメータを保存し、変更後のイオンビームの条件を元に比例計算させ、高 電圧端子電圧等を手動で調整した上で、計算後のパラメータを読み込む、という手順 で行っている。これまでは上流から順に光学機器を再調整してビーム加速を行ってい たが、スケーリング運転により、イオンビームの変更やビームエネルギーの変更に必 要な調整の手間や時間が大幅に削減できている。

また、加速器制御システムは、関連する複数の制御パラメータを同調させて別のパ ラメータで制御する連動制御が可能となっている。これによって複数のデバイス操作 が単純化し、運転員の負担軽減につながっている。 1.2. 新型コロナプローブの開発目的

現在のスケーリング運転や連動制御によって、東海タンデム加速器のイオンビーム 調整に要する効率は高くなっているが、高電圧端子電圧の調整を自動化できれば、さ らに効率化させることができる。高電圧端子電圧の制御には複数のパラメータを組み 合わせて電圧の印加や調整を行っているため、自動化を進めるために開発しなければ ならない装置はいくつかある。今回は、重要な開発要素として、電圧の調整及び安定 化を担っているコロナプローブの位置調整を自動化することにした。電圧制御のため の複数のパラメータのうち、コロナプローブ以外の装置は単純に電源の出力電圧を調 整するだけでよく、制御としては複雑ではない。しかし、コロナプローブの場合は位 置を数値化する必要があり、その駆動方法や制御方法の開発が新たに必要となる。

将来的には電圧の自動調整とスケーリング運転を統合し、ビームエネルギーの自動 調整を目標にしている。つまり、ビームエネルギーを連動制御のパラメータにして、 エネルギーの制御値を変化させるのに合わせて、高電圧端子電圧や光学機器パラメー タが連動して変化することを想定している。これが実現すれば、イオンビームを標的 に当てながらビームエネルギーを変えるということができ、新たなイオンビームの利 用法が開拓される可能性がある。 1.3. 電圧制御

図 1 に高電圧端子への電圧印加と電圧の安定化の仕組みを示す。

加速器の主要部分が、電気的絶縁を保つために絶縁ガス(SF₆)が充填された加速 器タンク内に入っており、絶縁カラムの上部に高電圧端子が設置されている。加速 器に入射されたイオンビームは地上電位と高電圧端子の電位差によって加速される。



図 1 電圧の印加と安定化の仕組み

1.3.1. 高電圧端子への電圧印加

高電圧端子への電圧印加はチャージングチェーンを用いて行われる。チャージン グチェーンは、地上電位において電荷を与えられ、回転しながら高電圧端子に電荷 を運び、高電圧端子に電荷を蓄えることによって高電圧を発生する。高電圧端子に 運ばれた電荷は加速電場を一様化するために加速管及び絶縁カラムに取り付けられ た電圧分割抵抗を流れて地上電位へ戻る。高電圧端子電圧は大まかには GVM (Generating Voltmeter)と呼ばれる回転電圧計で測定される。加速されたイオン ビームのエネルギーは加速器出口のエネルギー分析電磁石とダブルスリットにおい て詳細に分析される。 1.3.2. コロナプローブの役割

コロナプローブは高電圧端子に近接する加速器タンク内壁から高電圧端子に向かって取り付けられ、壁面からの位置を変化できるようになっている。コロナプローブの先端に取り付けた針から高電圧端子に向かってコロナ放電を発生させ、そのコロナ放電の電流量(プローブ電流)を、プローブ位置を変えることで調整し、高電圧端子電圧を粗く制御している。プローブ電流を10~30µAの適正な範囲に維持するため、プローブ先端での電場強度が同じになるように、高電圧端子の電圧が高い場合には高電圧端子から距離を離し、電圧が低い場合には高電圧端子に近づける。したがって高電圧の場合にはコロナプローブの位置はmm単位で位置調整する必要がある。

実際は後述する変動要素があるため、プローブ電流を三極真空管によって細かく 制御し、高電圧端子電圧を安定化している。

コロナプローブは高い電気絶縁性が必要であり、かつ、加圧された 0.5MPa の SF6 ガス雰囲気で使用される。

1.3.3. TPS システムによる安定化

チャージングチェーンによって運ばれる電荷の量(チャージング電流)は、その 機械的な工作精度やチェーンの振れ等により、イオンビームの加速を行うには十分 な安定度ではない。またチェーンの移動速度は約10m/secで、チェーンが一周する のに約2秒の時間がかかり、高電圧端子へのチャージング電流が一定になるにはそ れ以上の時間が必要である。また、イオンビームを加速する際にはイオンビーム電 流がチャージング電流と逆方向に流れることになる。これらの種々の変動要因によ って引き起こされる高電圧端子電圧の不安定性を抑えるために TPS システム

(Terminal Potential Stabilizer)が用いられている。GVM で測定された高電圧端 子電圧もしくはエネルギー分析電磁石とダブルスリットで分析されたイオンビーム のエネルギー信号により、TPS システムがプローブ電流をフィードバック制御する ことで高電圧端子電圧は目標電圧に調整されて安定する。チェーンの回転速度に比 ベコロナ放電による電荷の移動速度は圧倒的に早く、数十 msec である。

高電圧端子電圧を V_t 、チャージング電流を I_{charge} 、電圧分割抵抗の抵抗値をR、 抵抗に流れる電流を I_r 、イオンビーム電流を I_{beam} 、プローブ電流を I_{probe} とすると、 以下の式で表される。

 $V_t = R \times I_r$ $I_{charge} = I_r + I_{beam} + I_{probe}$ $V_t = R(I_{charge} - I_{beam} - I_{probe})$

上述の通り、チャージング電流は不安定であり、また、加速器の運転状況に合わ せてイオンビーム電流は断続的に変化するため、高電圧端子の電圧を安定させる には、プローブ電流を変化させて随時補正する必要がある。表 1 に加速器運転中 の高電圧端子に流れる電流の安定度と電流値の一例を示す。

表 1 高電圧端子に流れる電流の安定度と電流値の例

電流	安定度	電流値(例)
チャージング電流 (I _{charge})	不安定 ±5µA	80∼130µA
イオンビーム電流(I _{beam})	ビーム量の増減による	0∼5µA
電圧分割抵抗電流(Ir)	高電圧端子電圧が変化しなければ一定	50~100µA
プローブ電流(I _{probe})	TPS フィードバックにより調整	10~30µА

1.4. 旧型コロナプローブの問題点

従来の旧型コロナプローブは加速器設置当初から 30 年以上、大きな問題なく使 用されてきたが、制御方法や位置精度に問題があったため、電圧調整を自動化する ために必要な、プローブ位置調整を自動化するのが困難であった。

旧型コロナプローブの構造を図 2 に示す。旧型コロナプローブはシャフトに押し 付けたローラーを回転させることによって、前後に往復させ位置の調整を行う。ま た、位置読み取り用のローラーの回転量をポテンショメータで電圧に変換しコロナ プローブの位置を測定している。制御方法はモーメンタリ制御であり、加速器制御 システムにおいて、IN ボタンもしくは OUT ボタンを押している間だけその方向へ 動く制御方法をとっている。コロナプローブ全体が鉄でできた専用の加圧容器で密 閉されて加速器タンクと繋がっており、加圧容器の直径は約 15cm、全長は約 2.8m 及び駆動距離は 2.0m である。



図 2 旧型コロナプローブの構造

モーメンタリ制御では、運転員が IN ボタンもしくは OUT ボタンを押している間 だけ動作するため、コロナプローブを狙った位置に合わせにくい。加速器制御シス テムでは粗調整と微調整のモードを備えていたが十分な操作精度には至っていなか った。特に高電圧端子電圧が 15MV 以上の場合に顕著であるが、コロナプローブの 位置は数 mm 単位で調整する必要があるにもかかわらず、旧型コロナプローブの位 置精度は 5mm 程度であるため、IN ボタン及び OUT ボタンを何度も押して位置を 調整していた。その上、モーメンタリ制御は制御システムにとって通信負荷が大き く、このような調整を行っている最中に、しばしば制御システムの輻輳を引き起こ していた。

位置精度の低さはその駆動機構と位置読み方法に起因する。駆動精度の低いロー

ラーをモーメンタリ方式で制御している上にローラーとシャフトの滑りがあるため である。さらに、位置を検知するポテンショメータの出力電圧が不安定で、制御シ ステムから見た位置の読みに 1mm 程度のふらつきがあった。これに加え、位置の 読み値には年間約 2mm の系統的なズレが発生していた。おそらく動作中のローラ ーとシャフトの滑りが原因ではないかと考えられる。

また、コロナプローブ全体が専用の加圧容器で密閉され、加速器タンクと一体と なり 0.5MPa の SF₆ ガス雰囲気中で動作していた。直接、加速器タンクに設置され ているため、加速器運転中に不具合が発生した場合は、まず加速器タンクの SF₆ ガ スを回収し、次に大気(空気)で置換しなければコロナプローブの整備をすること ができない。加速器の運転を再開するには再びガスの充填を行う必要がある。これ らのガス回収及びガス充填作業には、のべ日数で一週間ほどかかってしまう。さら に加速管や絶縁カラムを大気に晒すために一時的ではあるが発生できる高電圧端子 電圧の上限が低下する。 2. 新型コロナプローブの開発

新型プローブの開発にあたっては、1.4 で述べた旧型プローブの問題を解決するため、 放電耐性や加圧環境下での動作保証のほかに以下の仕様を満たすものとした。

- ・ 位置調整を自動化するため、位置(数値)決め制御とする。
- ・ 位置精度は 0.1mm まで向上させ、動作中のズレを無くして位置の再現性を保証 する。
- ・ 故障してもガス回収をしなくて良いように整備性を向上させる。

また、後述するが、新型は旧型と異なり本体を加圧容器で密閉していないため、気密 シール部に対する以下の仕様を追加した。

- ・ 気密性の高いシールを使用し、もしもの場合のガス漏れを検知できるようにする。
- · 高電圧端子の放電サージによるシール部の劣化を防ぐ構造とする。

そして地震の揺れにより新型プローブが破損しないよう加速器タンクに固定した。

2.1. 構造及び改良点

新型コロナプローブの構造を図 3 に示す。新型では旧型と異なり駆動機構部を大 気圧側に置き、コロナプローブのシャフトをXリングと呼ばれる気密シールで密閉す る構造とした。筐体とフランジはアルミ製で、シャフトは直径 3cm のステンレス製 パイプを使用している。本体の重量は約 80kg、全長は約 1.5m 及び駆動距離は 1.2m である。駆動距離は旧型よりも短くなっているが、東海タンデム加速器で発生させう る電圧の下限を考慮すると、十分な距離である。

各種ケーブルはボールねじ機構の往復動作に合わせたプラスチック製のガイドチ エーンによって支持されている。プローブ電流が流れる高電圧ケーブル1本と、モー ター、マグネスケール及びローカルコントローラに接続した制御用ケーブル3本は、 放電を避けるため、高電圧ケーブル用及び制御ケーブル用の2つのガイドに分けら れ、筐体の両脇に取り付けられている。また、運転時には駆動部の埃よけのため、筐 体全体に鉄製カバーが取り付けられている。



図 3 新型コロナプローブの構造

2.1.1. 位置調整の自動化

ステッピングモーターによるボールねじ機構によって前後に往復させる。また、 位置検出には、非接触式磁気センサーの直接測定器(マグネスケール)を使用して いる。これらの位置決めおよび位置読み機構を用いて、加速器制御システムから指 示された目標位置にコロナプローブを追従させる位置決め制御を行う。

2.1.2. 位置精度の向上および位置の再現性の保証

位置決め精度は、アクチュエータ単体では 10µm である。動作させる際には、ま ず、位置の絶対値を決めるために最も抜いた側にリミットスイッチを設け、位置の ゼロ点調整(原点だし)を行うようになっている。位置読み精度は、マグネスケー ル単体では全長 1200mm に対して 62µm である。ただし、実際にはそこまでの精度 は必要では無いため、位置決め及び位置読み精度はシステム全体として 0.1mm で 運用している。シャフトに直接取り付けられたセンサーが位置を測定しているため、 旧型のような滑りによる読み値のズレは発生しない。

2.1.3. 整備性の向上

本体は図 3 に示すように加速器タンクとの間に仕切りバルブを設けて設置して いる。このため加速器運転中で SF6 ガスが加速器タンク内に充填されている状態で も仕切りバルブを閉じることで加速器タンクと切り離すことができ、加速器タンク のガスを回収せずに修理を行うことを可能としている。 2.1.4. ガス漏れ対策

加速器タンクとつながるシャフトの摺動部(シール部)は、O リングよりも摺動 に対する気密性の高い X リングを二重にして気密を保持している。写真 1 にシャフ ト摺動部を分解した様子を示す。旧型と異なり開放型であるため、動作中に摺動部 から SF6 ガスが大気中に漏れ出る可能性は残る。そのため、摺動部の X リングの間 にガス漏れ監視用圧力ゲージを付けている。また、シールが破損した場合は先に述 べた仕切りバルブを閉じることで SF6 ガスの放出を防ぐことができる。



写真 1 シャフト摺動部

2.1.5. サージ対策

高電圧端子の放電により、直接の放電電流やサージ電流がコロナプローブのシャ フトに流れた場合、摺動部のXリングで放電し、Xリングを劣化させてしまう恐れ がある。そこで、シャフトにマルチコンタクトを巻き付けて、サージ電流をXリン グの手前で加速器タンクに流しXリングの劣化を抑止するようにした。マルチコン タクトを押さえるアルミ製のシールフランジを製作し、コロナプローブの円形フラ ンジとシャフトの間に挿入して両者が良く導通するようにした。写真 2にマルチコ ンタクトとシールフランジを、図4に挿入箇所を示す。



写真 2 マルチコンタクト (左) とシールフランジ (右)



図 4 マルチコンタクトの挿入場所

2.1.6. 地震対策

コロナプローブはタンデム加速器建家の加速器タワー6 階において加速器タンク の外面に直接取り付けられている。加速器タンクの底部は3階で建家に固定されて いるのみで、コロナプローブのあるタワー6 階の床とは独立している。地震が発生 した場合には、加速器タンクとタワー6 階の床は別々に揺れることになるため、コ ロナプローブはタワー6 階の床に固定することはできない。

したがって、地震の揺れ対策として、加速器タンクに強固に固定するための専用 架台を設け、加速器タンクとの一体化を図った。写真3に示すように、コロナプロ ーブは、その専用架台と、加速器タンクからプローブ架台の両側面に伸びた2本の 吊り金具によって固定されている。



写真 3 加速器タンクに固定された新型コロナプローブ

3. 新型コロナプローブの制御

3.1. 制御方法

新型コロナプローブはサーボ機構による位置決め制御であり、運転員が目標位置を 入力すると、あらかじめ設定された速度でその目標位置に自動的に追従する。したが って目標位置に移動するまでに時間差が生じることに注意が必要であるが、一度、位 置を指示すれば良く、操作性が向上している。表 2 に加速器制御システムにおける新 型コロナプローブの制御データの一部を、写真 4 に制御画面を示す。この追従動作を 実現しているのは、プローブ本体と制御システム間の通信を担っているローカルコン トローラである。

制御データ	操作方法	説明
POS : 位置	数値を入力	目標位置と現在位置 (mm)
SPD : 速度		動作速度(%)
TRAK:追従	切り替えて使用	目標位置に追従する。
PAUS:一時停止		追従を止め、一時停止する。
RSET:リセット	電源投入時や	制御モジュール(ローカルコントローラ)の初期化
ORG : 原点だし	異常時に使用	プローブ位置の原点だし
EMG:非常停止		モーターの非常停止
REMG:非常停止復旧		モーターの非常停止からの復旧

表 2 新型コロナプローブの制御データ (一部)

16 CPB 17	6F		RSET ORG TRAK/PAUS	EMG	REMG	
18 CPB	6F	POS	100.0 MM			-246 - +956mm
19 CPB	6F	SPD	30. %			100%:2.0cm/s

写真 4 新型コロナプローブの制御画面

3.2. 制御モジュール

新型コロナプローブの隣に設置されたローカルコントローラが、ステッピングモー ターのサーボ駆動(位置決め)、マグネスケールとの通信(位置検出)、加速器制御シ ステムとの通信、リレー・スイッチ操作(インターロック信号の入出力)及びメンテ ナンス用 PC との通信を行っており、各モジュールの制御は、ローカルコントローラ に搭載された PIC マイコンの C 言語プログラム(周期動作プログラム)によって統 合され、加速器制御システムによる位置決め制御を実行している。ローカルコントロ ーラは我々が開発した光制御 CAMAC モジュールを介して加速器制御システムと通 信している。表 3 に各モジュール間の通信規格及び通信速度を示す。

親機	子機	通信規格	通信速度			
ローカルコントローラ	モーター・アンプ	ローカル	_			
ローカルコントローラ	マグネスケール・カウンタ	RS232C	38.4kbps			
ローカルコントローラ	メンテナンス用 PC	RS232C	38.4kbps			
光制御 CAMAC モジュール	ローカルコントローラ	RS485	0.5 Mbps			
加速器制御システム	光制御 CAMAC モジュール	CAMAC Highway	2.5Mbps			

表 3 モジュール間の通信規格と通信速度

ローカルコントローラから差動信号のシリアル通信 (RS485) で出力された信号は、 電気から光に変換され、制御室にある光制御 CAMAC モジュールへ送られる。光制御 CAMAC モジュールからの信号も同様に光から電気に変換され、RS485 規格でロー カルコントローラへ送られる。

光制御 CAMAC モジュールは、その他の CAMAC モジュールと同じように、 CAMAC Highway のデータラインを通して加速器制御システムとデータのやり取り を行っている。図 5 にそれぞれの制御モジュールと配線を示す。



図 5 制御モジュールと配線

4. 新型コロナプローブの動作

4.1. 動作試験

以下の順番で動作試験を進めた。

- 1) ボールねじ機構とマグネスケールの単独動作試験
- 2) テスト用チャンバーを取り付けて加圧(0.5MPa)下の動作試験
- 3) ローカルコントローラと光制御 CAMAC モジュール間の通信試験
- 4) 加速器制御システムへの組込
- 5) 加速器本体に取り付けて動作試験(旧型プローブと平行運用)
 ※マシンタイム(加速器の利用運転中)にしか行うことができないため、
 試験で不具合が発生しても代替として旧型を使用できるよう平行運用した。

実際にタンデム加速器の電圧を発生させて、コロナプローブの位置を変えながらプ ローブ電流を測定した結果を図 6 に示す。コロナプローブの電流と位置の関係は線 形となり、高電圧端子電圧が高くなるほど傾きが大きくなる。東海タンデム加速器で は、コロナプローブ電流は 10~30µA の範囲で使用するとビームが安定であるという ことが分かっている。したがって、高電圧端子電圧が高くなるほどコロナプローブの 位置を細かく設定する必要がある。



図 6 高電圧端子電圧: 5MV, 10MV, 15MV におけるコロナプローブの位置と電流

4.2. 旧型と新型の比較

制御方法をモーメンタリ制御から位置決め制御に変更した。これによって、制御シ ステムがプローブ位置を数値として取り扱えるようになり、プローブの位置調整が自 動化して操作が容易になった。また、加速器制御システムへの負荷がほぼ無視できる ようになり、プローブの操作中に輻輳を起こすことがなくなった。

駆動方法をステッピングモーターによるボールねじ機構、位置検知方法を磁気式センサーの直接測定とすることで、位置精度が 10 倍以上向上し、動作中のズレも無くなった。

整備性の向上として、加速器タンクとの間に仕切りバルブを設けたことで、ガス回 収を伴わずに修理が可能である。表 4 に旧型と新型の比較を示す。

	旧型	新型
制御方法	モーメンタリ制御	位置決め制御
操作	IN/OUT 押ボタンによる調整	位置を指定すると自動追従
駆動方法	ACモーター、ローラー	ステッピングモーター、ボールねじ
精度	5 mm	0.1 mm
位置検知	ローラー、ポテンショメータ、ADC	マグネスケール、磁気センサー
精度	1 mm、ズレあり 2 mm/年	0.1 mm、ズレなし
本体構造	密閉型、仕切りバルブなし	開放型、仕切りバルブあり
整備性	修理前後作業が必要。のべ1週間	即座に修理可能

表 4 旧型コロナプローブと新型コロナプローブの比較

4.3. 動作試験における不具合と対策

ここに、設置後の動作試験で生じた主な不具合事項を記す。

4.3.1. 絶縁不良

プローブ電流を増やしていくと、ある瞬間からプローブ電流が急に流れなくなる という、高電圧ケーブルと筐体間で放電していると思われる現象が発生した。

コロナプローブを試験的に動作させながら 5kV 絶縁チェッカーで絶縁測定する と、筐体に被せた鉄製カバーの切り欠き穴と、そこを通している高電圧ケーブルの 間で放電しているのを発見した。切り欠き穴の周りをアクリル板で加工してケーブ ルをプラスチック製のスパイラルチューブで保護することにより、放電しなくなっ た。写真 5 に対策後の鉄製カバーと高電圧ケーブルを示す。



写真 5 絶縁不良対策後の鉄製カバーと高電圧ケーブル

使用している高電圧ケーブルはボールねじの動きに合わせるためのキャタピラ状のガイド(曲げ半径 30mm)に通すために可撓性の高いケーブルである。仕様上は DC30kV耐圧となっているが、サージ的に高電圧が発生すると密接した導体との間 で放電してしまうことを確認した。上記の対策を施すことによって、絶縁不良は発 生しなくなった。

4.3.2. 動作中の揺れ

新型コロナプローブのシャフト(30mmΦ)は旧型コロナプローブのシャフト (80mmΦ)と比べて細くなっている。新型プローブのシャフトは、グリス不足で摺 動部の動きが悪くなった際に、最大速度及び最大挿入位置(速度:20mm/sec、位置: 加速器タンク内壁から高電圧端子に向けて+956mm)付近で動作させるとプローブ 先端が上下(ラジアル方向)に揺れてしまい、ソフトウェアインターロックがシャ フトの動作異常を検知してモーターが停止した。動作の安定性を確保するために、 ローカルコントローラはシャフトの動作を監視しており、一定の許容値を超過した 場合にはモーターが停止するようプログラムされている。動作異常は、モーターを 駆動しているのに位置が変化しない、またはモーターを駆動していないのに位置が 変化した場合に検知されるため、揺れが原因と考えられる。

シャフトにグリスを塗布すると動作時の揺れは無くなり、動作異常は検知されな くなった。念のため、許容値(移動判定速度と停止判定距離)をモーター停止が必 要な範囲で再調整(表 5)して運用に余裕を持たせた。

許容値	変更前	変更後
移動判定速度	0.020 (mm/s)	0.010(mm/s)
(これ以上ならばモーターは停止しない。)		
停止判定距離	2.0 (mm)	4.0(mm)
(これ以下ならばモーターは停止しない。)		

表 5 モーター停止条件(許容値)の変更前と変更後の値

5. まとめと今後

我々は東海タンデム加速器の高電圧端子電圧 (ビームエネルギー)の調整及び安定化 を担うコロナプローブの位置調整を自動化するために新たなコロナプローブを開発し た。ステッピングモーターとボールねじ機構による位置決め制御を採用することで、加 速器制御システムがコロナプローブの位置を直接、数値で制御することができるよう になり、位置調整を自動化することができた。過去のプローブ位置を再現する際は、旧 型プローブでは過去の記録を確認しながらモーメンタリ制御で手動調整していたが、 新型では過去のパラメータを読み込むだけで自動的に再現できるようになった。また、 これによって加速器制御システムへの負荷が無くなり、操作性も向上してビームエネ ルギーの調整に掛かる時間を大きく減らすことが出来た。運転中のエネルギー変更も 容易になり、複数のビームエネルギーを希望する利用者の要望にも容易に対応できる ようになった。

今後は、コロナプローブの位置調整とチャージング電流を制御する装置のパラメー タ群を、目標電圧を制御値として連動制御させることによって、高電圧端子電圧の自動 調整を進める予定である。高電圧端子の電圧に関係する装置群の連動制御を安定して 行うためには、表 1 で示した高電圧端子に流れる電流のバランスを取りつつ制御しな ければならない。そして、高電圧端子電圧の自動調整に加えてスケーリング運転をさら に改良し、リアルタイムで光学機器に反映させることができるようになれば、ビームエ ネルギーの自動調整が行えるようになる。それによって、イオンビームの軌道を変えず にエネルギーだけを連続的に変化させることができるようになれば、東海タンデム加 速器の新たな利用法の創出につながると考えている。

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	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				
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m ²				
体 積 立方メートル	m ³				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数 毎メートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²				
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	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

			SI 租立单位	
組立量	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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
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 ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号		
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v		

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	۰	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 ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
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 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(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 尾	属さないその他の単位の例
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$