

KEKにおけるSRF 5カ年計画 (MEXT-ATD) のための European XFEL タイプ入力結合器の設計と製造

DESIGN AND PRODUCTION OF EUROPEAN XFEL-TYPE POWER COUPLER FOR STF 5-YEAR PLAN (MEXT-ATD) AT KEK

片山 領^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, オメット マチュウ^{A)}, 道前 武^{A)},
山田 智宏^{A)}, 山本 康史^{A)}, カザコフ セルゲイ^{B)}

Ryo Katayama^{*A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Mathieu Omet^{A)}, Takeshi Dohmae^{A)}, Tomohiro Yamada^{A)},
Yasuchika Yamamoto^{A)}, Sergey Kazakov^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Fermi National Accelerator Laboratory

Abstract

A five-year project (MEXT advanced Accelerator element Technology Development (MEXT-ATD)) funded by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) began at KEK in FY2023. The final goal is to manufacture a cryo-module that satisfies the ILC (International Linear Collider) specifications and to conduct cooling tests. The necessary components such as cavities, input couplers, magnetic shields, and so on will be manufactured according to the Technical Design Document (TDR) published in 2013. The basic design of the input coupler of ITN cryo-module will be based on the design of the European XFEL currently in operation in Europe. On the other hand, for higher reliability, a new ceramic window, recently developed in collaboration between KEK and a Japanese manufacturer company, will be installed. For this purpose, the RF design was redone and the ceramic thickness was optimized under the Japan-U.S. Science and Technology Cooperation. In addition, ceramic samples were fabricated for brazing tests, thermal cycling tests, and TiN coating tests. We will start the actual manufacturing phase of the input couplers in FY2024. In this presentation, we will report on the recent progress.

1. INTRODUCTION AND MEXT-ATD PROGRAM

KEK は 2023 年度から 2027 年度にクライオモジュール (Cryomodule, CM) を 1 台製作して、その冷却試験 (RF のみでビーム無) を行うことを目的とした文部科学省 ATD プログラム (MEXT advanced Accelerator element Technology Development (MEXT-ATD)) の予算を獲得した。このクライオモジュールは、国際リニアコライダー (ILC) 計画の仕様を満足する 8 台の超伝導加速空洞、8 台の周波数チューナー、8 台の入力結合器 (FPC: Fundamental mode Power Coupler)、8 個の磁気シールド、1 台の SC 電磁石で構成される。インフラ構築には、ヘリウム冷凍機、テストバンカー、ハイレベル RF システムが必要である。一方、ITN (ILC Technology Network) はグローバルな協力体制で進められており、特に、KEK-DESY の European XFEL に関するライセンス契約の更新と日米科学技術協力の二つが FPC の研究に大きく貢献した。FPC の製造・試験スケジュールに関しては、2024 から 2025 年度にかけて 8 台の FPC の実機を製造、2025 から 2026 年度までの間は製造した FPC の RF テスト、2026 年度は FPC の cold part のアセンブリ、2027 年度は warm part のアセンブリ、2027 年度中にはクライオモジュールの最初の冷却試験が行われる予定である。

2. SPECIFICATION OF FPC

MEXT-ATD 計画の FPC は、ILC 計画で使用する各コンポーネントの基本性能を定めた Technical Design Report

(TDR) [1] に沿った仕様とする必要がある (Table 1)。ここで、TDR では TTF-3 カップラーの使用を推奨している。ただし、近年の European-XFEL の建設に際して TTF-3 を改良したより新しい FPC の設計・製作が行われたため、本計画においても、European-XFEL の FPC [2-4] を採用することにした。一方で、以下で述べるような European-XFEL の FPC の設計からの変更点もいくつか存在する。

- MEXT-ATD 計画では、FPC の高周波窓材のセラミックスとして京セラ製の A479U を採用することにした。その理由として、高純度・高信頼性・国内調達可能、などが挙げられる [5]。ただし、この材料は European-XFEL のセラミックスと異なる RF 特性を示す (Table 2)。 ϵ は 0.4、 $\tan\delta$ は 10 倍程度異なっており、RF 透過特性に違いを生むと予想される。その結果、FPC においてはセラミックス材の板厚として 0.3 mm 薄くする方向にした (理由は後述する)。
- European XFEL ではプッシュロッド型のベローズの節の数として 36 を採用しているが、この節の数を増やしたことで、特殊な RF の共鳴条件が生じ、その結果、RF リークによる放電が生じてしまい、FPC のクライオモジュールへのインストール後に交換作業が必要になった苦い経験がある [6]。そこで、今回はこの問題を避けるため、プッシュロッド型のベローズの節の数として TTF-3 カップラーと同じ 18 に戻すことにした。TTF-3 カップラーは、DESY の FLASH 加速器にて 20 年以上に亘る運転実績があるため、十分に信頼できる設計である。
- European XFEL では常温部の導波管を銅で製造し

* ryo.katayama@kek.jp

Table 1: Specification of FPC

Parameter	Specification	Unit
Frequency	1.3	GHz
Operation pulse width	1.65	msec
Operation repetition rate	5 (usual) / 10 (low energy)	Hz
Required RF power in operation	~400	kW
Range of external Q	$(1.0 - 10) \times 10^6$	
RF power in cryomodule	> 1.2 MW for $\leq 400 \mu\text{sec}$ > 500 kW for > 400 μsec	
RF power in test stand	> 600 kW for 1.6 msec	
Number of windows	2	
Bias voltage capability	Required	

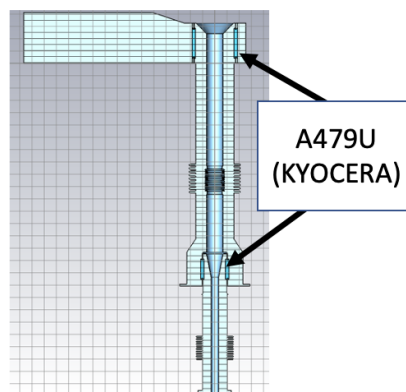


Figure 1: Simulation model of FPC defined by KEK.

ているが、今回はこれまで KEK で実績のあるアルミに変更した。

- 今回のクライオモジュールの試験ではビームを通さないため、ケーブルの RF 結合度を遠隔で調整するためのアクチュエータは取り付けないことにした。

Table 2: Comparison of Ceramics Properties of E-XFEL and A479U

	ϵ	$\tan\delta$	Wall Thickness
E-XFEL at 1.0 GHz	9.3	2.6×10^{-4}	6.0 mm
A479U at 1.3 GHz	9.7	3.6×10^{-5}	5.7 mm

3. RF DESIGN OF POWER COUPLER BY CST

Table 2 より、A479U と E-XFEL のセラミックス材料は RF 伝送特性が若干異なると予想される。そこで、日米科学技術協力の下、KEK と FNAL それぞれにおいてシミュレーションによる FPC の RF 特性の評価が行われた。本研究では、RF シミュレーションソフトウェアとして CST Micro Wave STUDIO を使用した [7]。また、FY2025 年度に予定されている KEK 内 STF 棟の resonant ring システムにおける FPC の大電力試験を想定したシミュレーションも行った。本研究では、Frequency Domain Solver を選択して S_{11} vs Frequency の評価が行われている。以下にシミュレーションで得られた結果について記す。

3.1 Fundamental Mode Power Coupler(FPC)

KEK が定義した FPC のシミュレーションモデルを Fig. 1 に示す。このシミュレーションモデルは、導波管、warm part、cold part、ベローズ、A479U 製の 2 つのセラミック窓が組み込まれている。シミュレーションに用いたメッシュ数は約 100 万である。 S_{11} vs Frequency を Fig. 2 に示す。セラミックスの板厚を European XFEL と同じ 6.0 mm にした場合、1.3 GHz での S_{11} の値は -20 dB であった。一方で、板厚を 5.7 mm にすると 1.3 GHz における S_{11} の値は -22 dB に改善された。これが本計画において、セラミックスの板厚が 5.7 mm に設定されて

いる理由である。FNAL のシミュレーションでも同様に、セラミックの厚みを薄くすると 1.3 GHz における S_{11} が改善することがわかった。

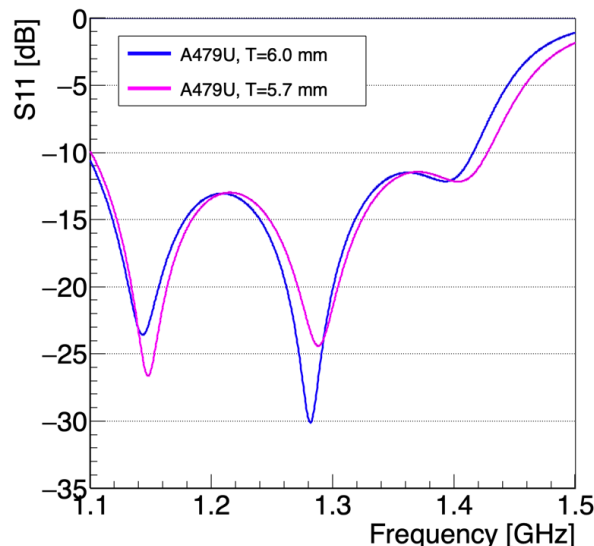


Figure 2: S_{11} value as a function of frequency for FPC.

3.2 Test Stand model

KEK/STF における FPC の RF テストスタンドを想定したシミュレーションによる RF 特性の評価を行った。本研究で用いたシミュレーションモデルを Fig. 3 に示す。このモデルにおいては、まず DESY が European XFEL で使用したのと同じ寸法の結合導波管を定義し、そのポート上に二つの FPC が取り付けられている。シミュレーションでは、アンテナの挿入量を変化させながら S_{11} の値を評価した。参考のため、Fig. 3 にアンテナ先端付近の拡大図を示す。図の垂直軸を y 方向と定義したとき、シミュレーションで変化させるパラメータは $|y_A - y_B|$ である。A は接続導波管上面の同一平面上の固定点、B はアンテナの先端に対応した移動点である。なお、本研究では、二つの FPC のアンテナを同時に等

量だけ挿入することを想定した S_{11} の評価を行った。シミュレーションに用いたメッシュ数は約 140 万であった。周波数の関数としての S_{11} 値を Fig. 4 に示す。縦軸は S_{11} 値、横軸は周波数である。線の色はアンテナの挿入量の度合いを示す。結果、1.3 GHz の S_{11} 値はパラメータが 24.5~25.5 mm の間にあるときに -20 dB 以下を達成できることがわかった。一方、今回製造する FPC の内導体の可変範囲は ± 10 mm である。この量は -20 dB 以下を達成できる 1 mm をカバーするのに十分であることから、FPC の RF テストを STF の resonant ring システムで問題なく実施できることが示された。

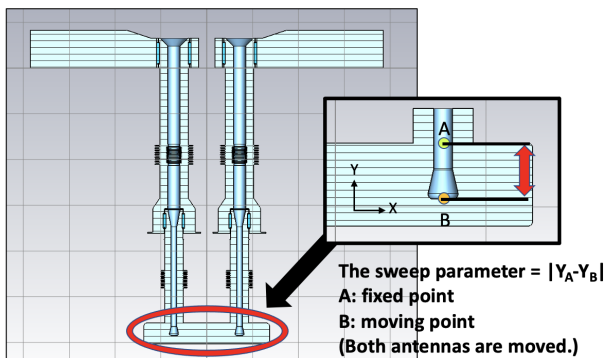


Figure 3: Simulation model of RF test stand of FPC.

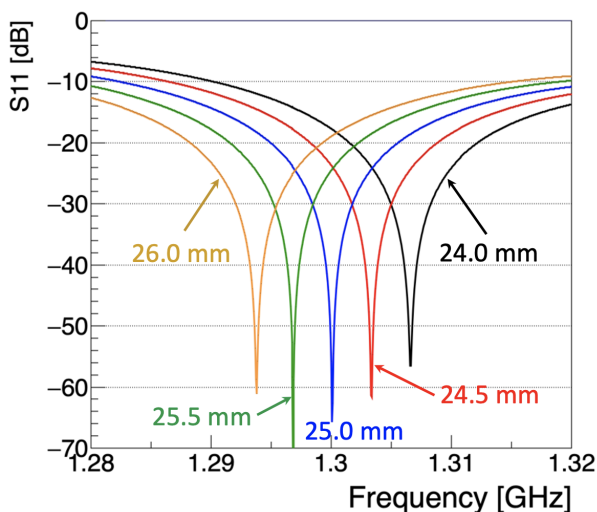


Figure 4: S_{11} value as a function of frequency for RF test stand of FPC.

4. QUALITY CONTROL/ASSURANCE BEFORE PRODUCTION

FPC の製造前の品質管理・保証を行うためサンプル試験を実施する必要がある。現在計画中の試験について Table 3 にまとめる。実際に製作した Cold 用セラミックサンプルの写真を Fig. 5 に示す。これは cold part に設置するセラミックス材のサンプルであることに注意されたい。TiN コーティングのテストは準備中である。

Table 3: Sample Tests for Ceramics Materials

Process	Item to be checked
Brazing	Brazing test (cold/warm)
Brazing	Thermal cycle test (only cold)
Brazing	Tensile test (cold/warm)
TiN coating	TiN coating (cold/warm)
Copper Plating	RRR measurement at various thickness
Copper Plating	Mechanical property check
Bellows	Lifetime test

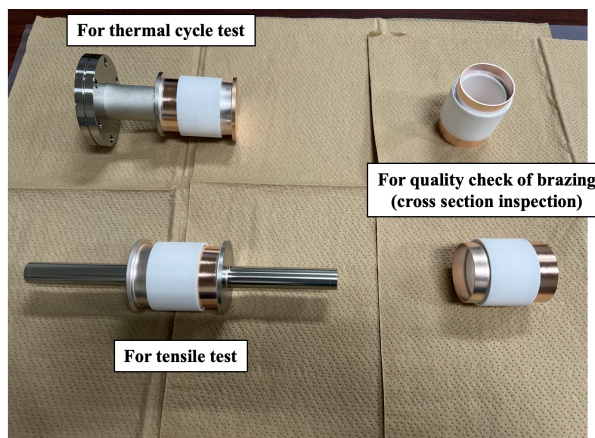


Figure 5: Photo of cold ceramics samples.

5. SUMMARY

KEK において 2023 年度からの 5 年計画として文部科学省の補助金による MEXT-ATD 計画が始まった。2027 年度にクライオモジュール 1 台の製造を完了し、バンカーで冷却試験を行う予定である。European XFEL の基本設計を採用した FPC を 8 台生産するが、いくつかの点が異なっている。特に、セラミックス材料の変更は RF 特性に影響を与えるため、KEK と FNAL は RF シミュレーションを実施してその影響を評価した。KEK と DESY はライセンス契約を更新し、詳細図面と仕様書が完成した。KEK では FPC に関する品質チェックを行う準備が進められている。2025 年度から STF で大電力試験が開始される予定である。

謝辞

本研究に助力いただきました FNAL の S. Belomestnykh 氏、DESY の H. Weise 氏と D. Kostin 氏、JJC Lab の W. Kaabi 氏と A. Miyazaki 氏に謝意を表します。本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] T. Behnke *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report”. <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>

- [2] D. Kostin, “E-XFEL input coupler design and simulations, Visit report of IRDA delegation at DESY (2016)”, https://bib-pubdb1.desy.de/record/312081/files/IRDA-Visit_XFEL_coupler_Kostin.pdf
- [3] W. Kaabi *et al.*, “Power couplers for XFEL, IPAC 2013 proceedings, Shanghai, China, pp. 2310–2312, WEPWO001. <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2013/papers/wepwo001.pdf>
- [4] J.N. Galayda, “The new LCLS-II Project: Status and challenges”, LINAC2014 proceedings, Geneva, Switzerland, pp. 404–408. <https://accelconf.web.cern.ch/LINAC2014/papers/tuioa04.pdf>
- [5] 山本裕亮, 吉住浩之, 中村勝美, 山本康史, 道園真一郎, “高周波窓に用いられるセラミックに関する研究”, 第十八回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 1015–1019, WEOA02.
- [6] D. Kostin, J. Branlard *et al.*, “EUROPEAN XFEL LINAC RF SYSTEM CONDITIONING AND OPERATING TEST”, SRF2017 proceedings, Lanzhou, China, pp. 328–331, MOPB111.
- [7] CST Studio Suite, “CST Microwave Studio”, 2023, <http://www.cst.com>