arXiv:2603.01172v1 [physics.acc-ph] 1 Mar 2026

ILC技术网络活动中期现状报告

由ILC技术网络（ITN）成员编写*

2026年2月28日

（修订自2025年12月24日的首个版本，IDT-ITN-2015-1.V1）

摘要

ILC技术网络（ITN）由国际未来加速器委员会下属的国际直线对撞机国际发展团队于2022年成立，旨在推进面向实现国际直线对撞机（ILC）的工程研究。虽然ITN工作包聚焦于ILC的工程活动，但其主题也与粒子物理学及其他领域中广泛的加速器应用相关。目前，亚洲和欧洲的实验室正在密切合作开展这些工作包。本报告总结了ITN活动的当前现状。

*本文档的作者及ITN成员名单见第4节

目录

1 引言 3

2 工作包 5

2.1 超导技术领域.5 2.1.1 超导射频（SRF）生产（WPP-1）.5 2.1.2 低温模块设计（WPP-2）.12 2.1.3 蟹形腔（WPP-3）.17 2.2 电子与正电子源领域.21 2.2.1 电子源（WPP-4）.21 2.2.2 波荡器方案正电子源（WPP-6/7）.22 2.2.3 电子驱动正电子源（WPP-8-11）.28 2.3 纳米束区域.39 2.3.1 阻尼环设计（WPP-12）.39 2.3.2 阻尼环注入与引出系统（WPP-14）. 41 2.3.3 最终聚焦（WPP-15）.42 2.3.4 磁体振动评估（WPP-16）.47 2.3.5 束流倾倒器设计（WPP-17）.48

3 结论 51

4 ILC技术网络 51

1 引言

国际直线对撞机（ILC）的技术方案已在全球设计工作组（GDE）团队于2013年 [1], 发布的技术设计报告（TDR）中进行了阐述。国际发展团队（IDT）在 2022 [2],中提出的 ILC 预备实验室（Pre-lab）提案，概述了建设所需的下一阶段工程研究。

GDE 和 IDT 均是在国际未来加速器委员会（ICFA）的支持下成立的。该委员会旨在推动将直线对撞机作为全球项目加以实现。具体而言，IDT 的任务是支持日本学界提出的在日本建设国际直线对撞机的方案。

由于日本政府认为 2023年 转入预备实验室阶段为时尚早，IDT 转而致力于建立国际直线对撞机技术网络（ITN），这是一个由全球各地实验室组成的合作网络，通过共享资源推进国际直线对撞机的工程研究，为其建设做好准备。

预备实验室方案确定了三个技术领域的 18 个工作包：

- 超导
- 电子和正电子源
- 小束斑束流（纳米束）

在这些工作包中，IDT 选出了 15 [3] 个特别关键、需要投入大量时间和精力的工作包。这些工作包后来成为表 1 所述的 ITN 工作包。

Area	工作包	名称
超导	1	腔体制造
	2	低温模块设计
	3	蟹形腔
源	4	电子源
	6	波荡器靶
	7	波荡器聚焦
	8	电子驱动靶
	9	电子驱动聚焦
	10	电子驱动俘获
	11	靶更换
纳米束	12	阻尼环系统设计
	14	阻尼环注入/引出
	15	最终聚焦
	16	末级双磁铁
	17	主束流倾倒器

表1：ITN工作包列表

ITN由IDT发起，临时由IDT加速器工作组召集人担任项目负责人，并由IDT执行委员会负责监督。KEK在其中发挥核心作用，并获得专项预算支持。根据CERN–KEK协议，欧洲核子研究中心作为欧洲枢纽实验室，通过与欧洲研究机构签订协议，促进其参与。已有多家欧洲实验室在这一框架下加入，并为各个工作包作出贡献。在美国，实验室已表示有意为ITN作出贡献，并积极参与讨论。不过，由于资金方面存在不确定性，这些实验室尚未正式全面参与。

ITN原计划在有足够数量的实验室加入后，发展成为一种国际合作，其组织结构可与重大粒子物理实验所建立的合作组织相媲美。鉴于目前美国参与情况尚不确定，2024年8月举行的ITN会议商定，暂时维持临时组织模式。

以下各节将介绍 ITN 工作包，列出承诺参与各工作包的研究机构，并总结截至目前取得的进展。

2 工作包

2.1 超导技术领域

2.1.1 超导射频腔体的生产（WPP-1）

2.1.1.1 描述

WPP-1 涉及在每个参与国制造符合日本《高压气体安全法》的九-cell 超导射频（SRF）腔体。各国采用统一技术规格是实现国际直线对撞机（ILC）腔体成功国际产业化的必要条件。在各地采用最新表面处理后，通过垂直测量开展性能评估。通过垂直测量确认性能后，将腔体集成到低温模块中，并进行水平测量。目标性能如表 2 所示。

表2：国际直线对撞机超导射频腔体性能的技术设计报告目标

	参数	设计
垂直测试	梯度、Q值（Q_0）	35.0 兆伏/米，带有 $Q_0 \geq 0.8 \times 10^{10}$
低温模块测试	梯度、Q值（Q_0）	$Q_0 \geq 1.0 \times 10^{10}$ 时为 31.5 兆伏/米

2.1.1.2 亚洲现状

尽管腔体制造工作有所延误，但总体进展顺利。截至目前，已完成六个单单元腔和三个九腔腔体（其中包括一个采用中晶粒（MG）材料制造的九腔腔体，这是全球首例）。这项工作由 KEK 的腔体制造设施与国内制造商合作开展。此外，KEK 首次向海外制造商下达了 2025财年的订单，计划在 2025财年末前完成九个腔体（最初计划为 12 个）。随后将进行表面处理和垂直测量。氦槽焊接计划于 2026年 至 2027年 进行，为腔串做好准备。所有腔体均按照《高压气体冷冻法规》制造。图 1 列出了已完成和目前正在制造的腔体。

MG材料是过去几年与美国杰斐逊实验室合作开发的一种新材料，旨在提高洁净度并降低成本。如图2所示，其性能已在单-cell 腔中得到验证，因此决定制造 9-cell 腔并进行性能测试。此外，欧洲和韩国也已制造单-cell 腔，目前正在进行性能评估。

所有六个已完成的单-cell 腔均采用最新的表面处理工艺——两步烘烤（两步（75/120°C）温度热处理），随后进行了垂直测试。每个腔都满足ILC规格（35兆伏/米±20%）。正如预期，获得了高于 1.0×10^{10} 的Q值。这确立了两步烘烤工艺，图3所示的九腔腔体也将采用相同的表面处理。

高压气体作业正在按照冷冻法规推进。尽管比最初计划落后约六个月，但进展稳定。腔体制造的审批现已获批，因此可以开始生产

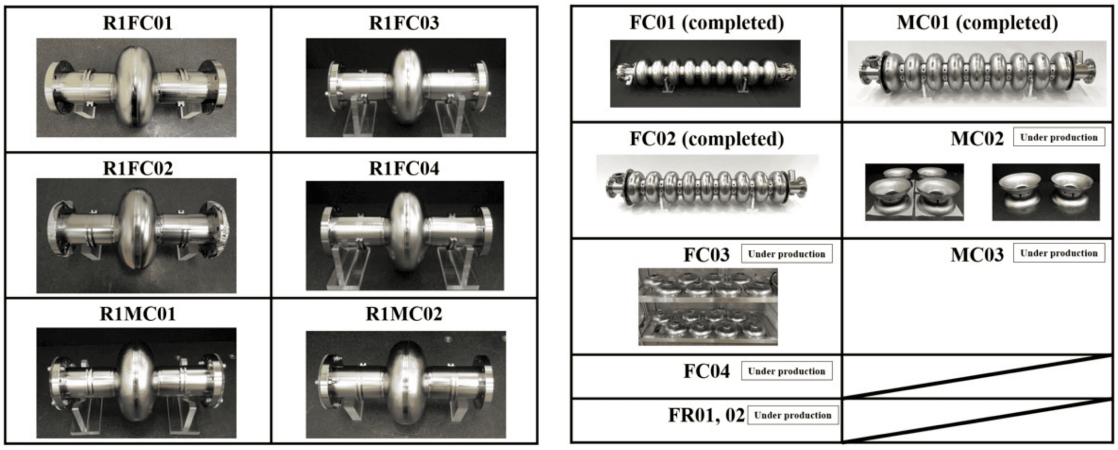


图1：日本的腔体列表

腔体和氦罐。随后将提交烟囱管（连接氦槽与两相管道的特殊管道，采用钛-不锈钢异种材料接头）和两相管道的制造申请。烟囱管预计采用法兰连接。

日本的9单元腔目标性能如表3所示。由于发现新开发的表面处理方法（两步烘烤）可实现较高的Q值，因此仅修订了垂直测试性能。

表3：新开发超导射频腔的国际直线对撞机性能目标

	参数	设计
垂直测试	梯度、Q值（Q_0）	35.0 兆伏/米，带有 $Q_0 \geq \mathbf{1}_\circ \mathbf{0} \times 10^{10}$
低温模块测试	梯度、Q值（Q_0）	31.5 兆伏/米，带有 $Q_0 \geq 1.0 \times 10^{10}$

KEK-DESY 许可协议 本项目所用的腔体和辅助部件等部件，其原始设计基于欧洲为欧洲X射线自由电子激光项目建造的整套方案。因此，KEK与DESY签订了许可协议，以制作图纸和技术规格。该协议仅允许为ITN目的使用E-XFEL的技术规格和图纸。

KEK-欧盟合作 KEK提供了铌材料，以便使用相同材料评估腔体性能。这些材料用于制造单-cell 腔和9-cell 腔。此外，腔体制造采用KEK提供的标准化图纸。KEK定期与欧洲研究机构（欧洲核子研究中心、法国原子能和替代能源委员会、INFN）召开有关腔体制造的会议。目前正在制定标准化技术规格，以用于合同事宜。对于9-cell 腔，由于涉及高压气体，技术规格更为详细。预计各地区的表面处理规范会因设备不同而有所差异，因此将分别制定规范。在E-XFEL和LCLS-II材料评估方面拥有丰富经验的DESY负责评估铌材料（涡流扫描系统）。DESY使用MG材料制造了一个单-cell 腔，并进行了性能评估。

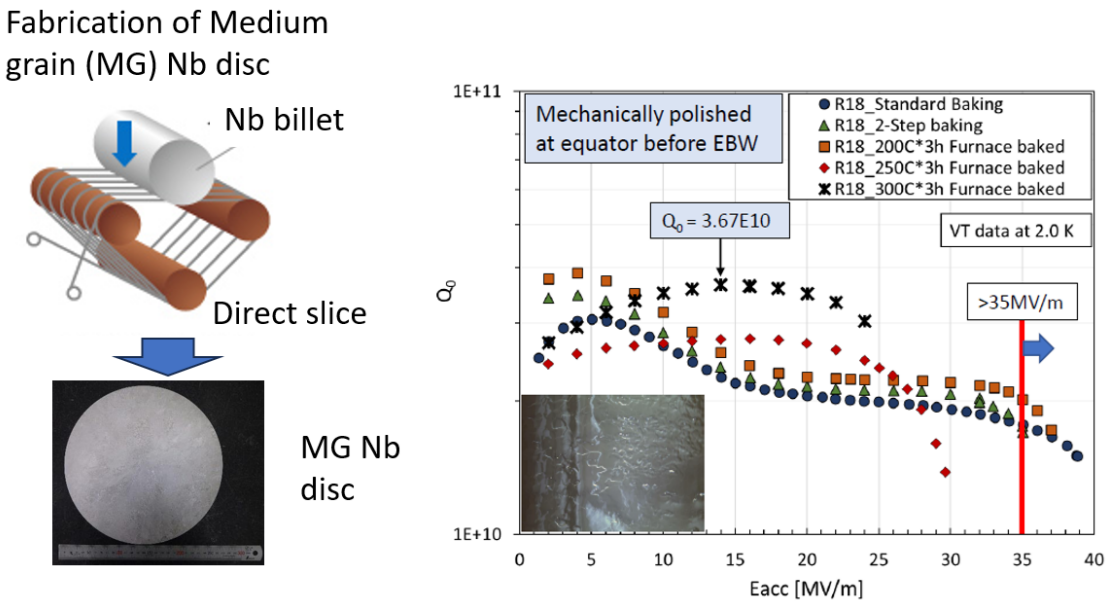


图2：中晶粒铌圆盘的制造方法及单单元MG腔垂直测试结果。 [4]

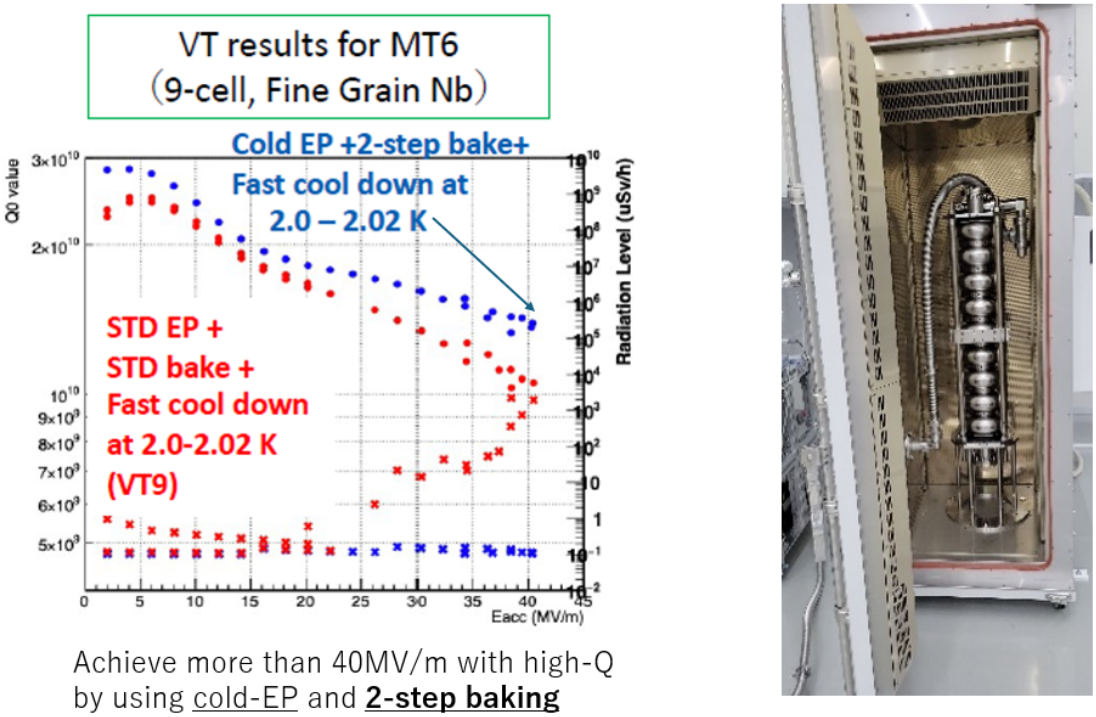


图3：采用两步烘烤的9单元腔性能测试结果。 [4]

韩国KEK与高丽大学定期举行腔体制造相关会议。KEK提供了所需材料，并一直提供技术指导和建议。两个单单元腔（FG材料和

MG材料）由一家韩国制造商完成制造，随后送至 KEK 进行表面处理和垂直测试。结果成功满足更新后的国际直线对撞机和 ITN 技术规格（$35MV/m \pm 20\%$ 1.0×10^{10}）。高丽大学的学生和制造商工作人员参与了在 KEK 开展的工作。图 4 展示了完成制造的两个单单元腔、垂直测量装置及测试结果。在展示了单单元腔的性能后，目前正在试制一台采用铜材料的 9-cell 腔。待制造技术确立后，计划采用铌材料进行制造。

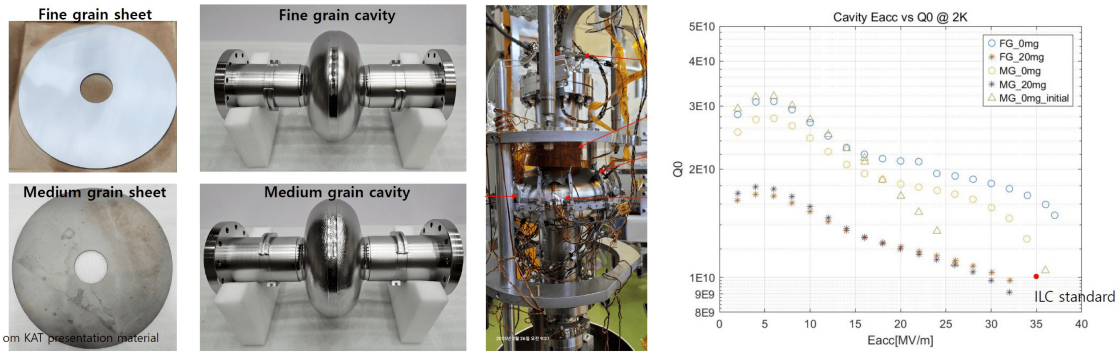


图 4：韩国腔体的性能

总体时间表 目标是在 2026年 完成九台 9-cell 腔，并依次进行表面处理和垂直测试，在两个垂直测试（VT）周期内评估成功率。目标数值为平均 35.0 兆伏/米，Q值为 1.0×10^{10}。垂直测试后将进行氦容器焊接，完成腔串的准备工作。

2.1.1.3 欧洲现状

ITN-EU联盟已在欧洲核子研究中心的协调下成立，法国原子能和替代能源委员会（CEA-Saclay）和INFN-LASA作出了重要贡献。这一合作汇集了材料科学、腔体制造和测试方面的互补专业知识，确保欧洲在超导射频技术发展方面的贡献既具备坚实的技术基础，又与国际工作保持一致 [5, 6]。

单-cell 腔体的材料采购已顺利完成，铌板和圆盘均已交付，并通过 DESY 提供的涡流扫描（ECS）完成了资格认证。这确保了材料不含夹杂物，且符合腔体制造所需的技术规格。目前，两只单-cell 腔体正在制造中，将作为首个测试台，用于验证图 5 所示的制备和表面处理策略。

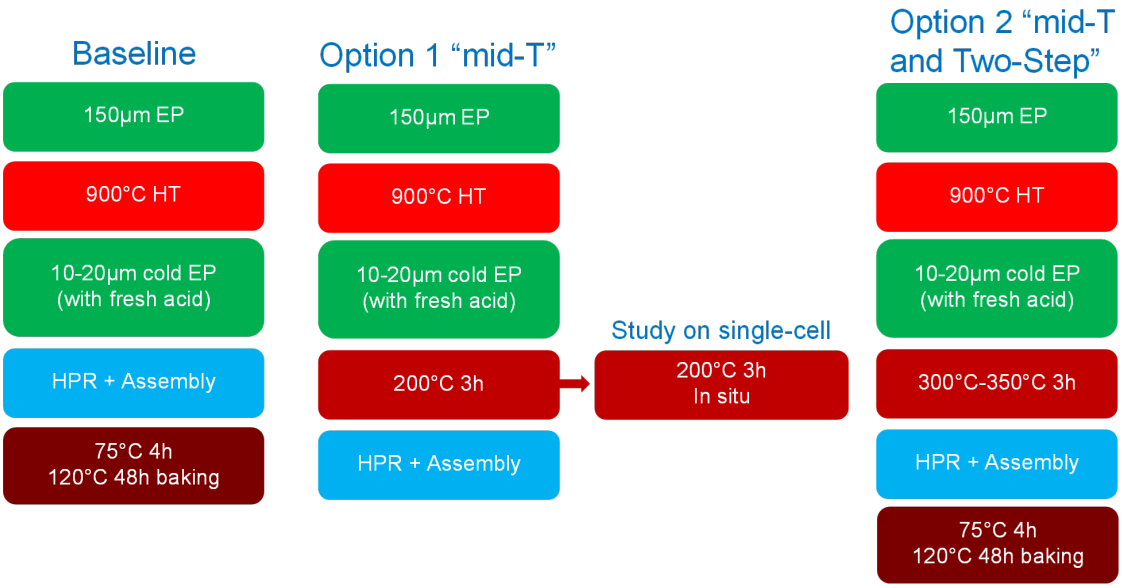


图5：单-cell研发的表面处理配方

单-cell 和九-cell 的制备时间表 2025年，已成功制造两只单-cell 腔体，其表面制备工作将在欧洲进行检查

垂直低温测试将于2026年随后进行，以评估其性能并验证制造工艺。

我们目前正在最终确定于2026年初授予制造及表面处理合同所需的各项步骤。该过程包括完成合同要求、遴选合格供应商，并确保所有技术规范和质量要求均已明确界定。合同一经授予，即可对两个腔体进行生产和表面处理；这些腔体计划于2026年交付至KEK，并已充分准备就绪，可进入套管工序。

材料采购和质量控制 用于单-cell和9-cell 腔的全部材料已由KEK成功采购并交付至欧洲核子研究中心。

材料采购的技术规范已由KEK编制，并考虑了高压气体安全（HPGS）要求。所有腔体将使用铌 FG（Tokyo Denkai）生产，而一个单-cell腔体将采用铌 MG（ATI）制造，用于洁净度与降本研究。此外，已为所有物项采购备件，用于表面处理的研发研究以及机械/焊接测试：这些备件将用于对欧盟工业企业进行资质认定，以满足HPGS要求，从而推进全球大规模生产所需的压力容器规范协调统一。

鉴于对1.3 GHz ILC腔体严格的性能要求，DESY于2024年使用涡流扫描（ECS）对所有FG和MG铌板/圆片进行了质量控制（QC），作为其对ITN的贡献。对铌板/圆片进行的ECS在规格要求方面均完全符合要求，且未发现任何异物。只有一片MG圆片在靠近边缘处显示出铁信号（位于铸锭末端）；这并不构成风险，因为该信号可能是铸锭在进行单元/圆片制造之前的切割过程所导致的。图6展示了这片MG圆片的ECS结果，以及因存在异物（铁）而进行的进一步分析。

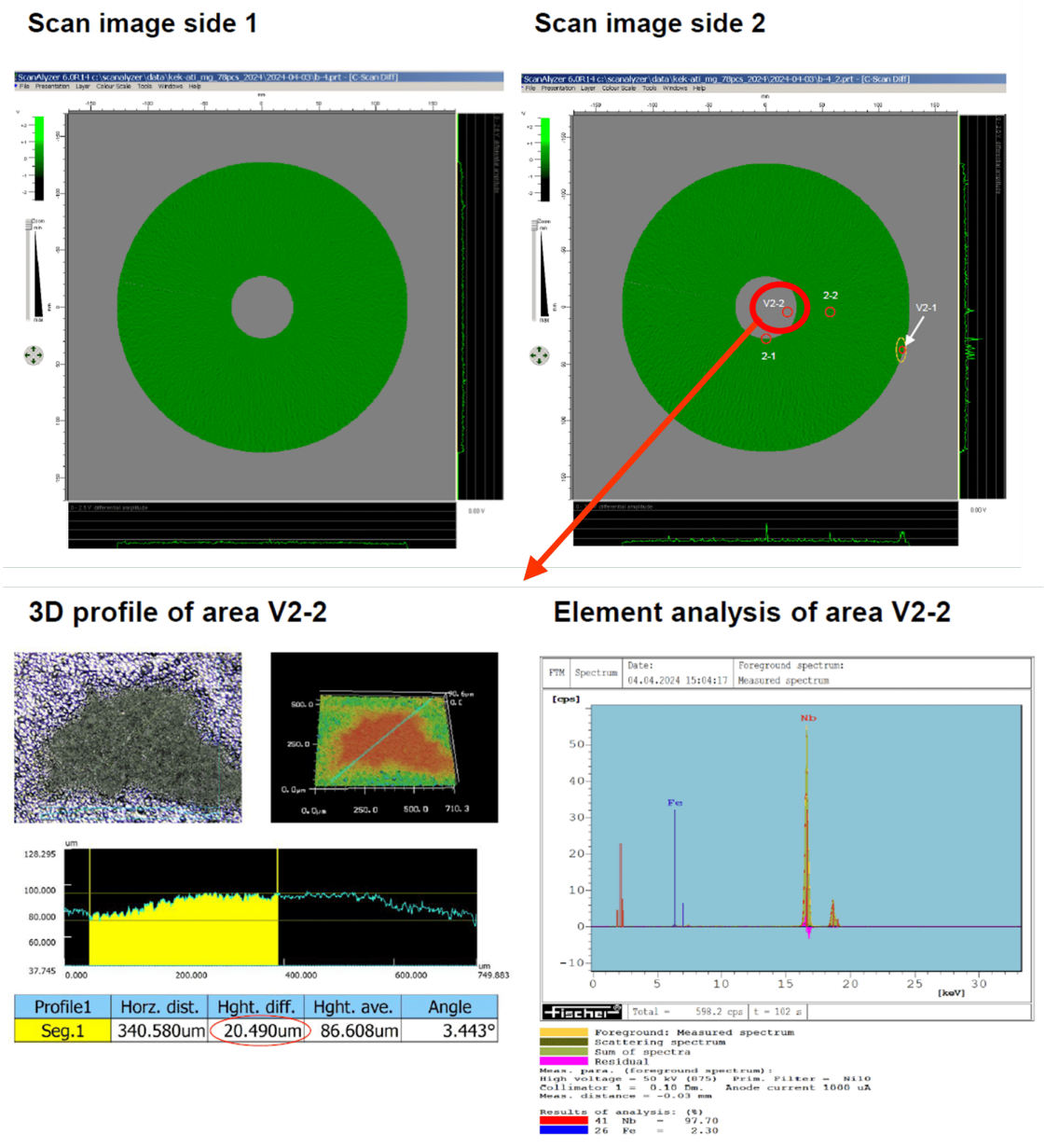


图 6：DESY 对 MG圆片进行的 ECS、三维轮廓及元素分析结果。

用于腔体的铌的验收标准定义如下：

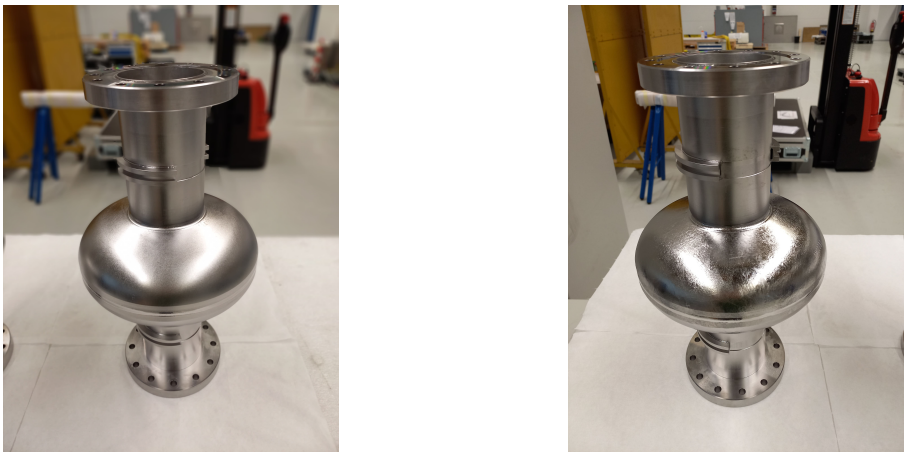
- 不含非铌夹杂物
- 表面粗糙度： $R_a \leq 1.6\,\mu\text{m}$
- 最大高度： $R_t \leq 15\,\mu\text{m}$
- 划痕或凹陷： $R_t \leq 15\,\mu\text{m}$

单腔活动自2024年起，相关活动一直致力于制定单腔生产的技术规范，并采用腔体制造中通常使用的所有质量控制规程，以便欧盟工业企业更好地为后续的9单元腔制造做好准备。

订单于2025年3月下达给RI Research Instruments GmbH（订购2个单腔，MG和FG，以及基线表面处理）。RI于2025年4月底收到所有材料，并开始机械制造。两只单单元腔于2025年9月完成制造。图7展示了机械加工后的FG和MG单单元腔。

预计交付两个采用基线Eu-XFEL类工艺处理的单单元腔，随后将在2 K下进行低温垂直测试，以检验腔体性能。需探究细晶粒铌腔与中晶粒铌腔之间可能存在的性能差异。

由单一生产商开展单芯腔相关活动十分重要，以确保两种铌材料之间的性能可进行统一比较，避免因第二供应商采用不同的机械加工或处理工艺而可能引入偏差。



(a) 细晶粒单单元腔。　(b) 中晶粒单单元腔。

图7：机械加工后的细晶粒与中晶粒单单元腔（RI）

九单元腔体相关活动 为满足紧张的ITN时间表，当前首要任务是由欧盟工业企业完成四个裸九芯腔的机械加工，随后采用通过单芯腔研发活动确定的最佳表面处理配方。将在2 K下进行垂直测试，并由不同ITN合作实验室交叉核验，以确保一致性与可靠性。欧洲腔体制造商（RI和ZRI）都必须积极参与这一阶段，以在HPGS方面实现全面资质认证，为未来面向ILC的生产铺平道路。

通过鉴定后，两只裸腔体将立即（于2026年10月前）运往KEK进行套管，并随后集成到ILC型低温模块中。法国原子能和替代能源委员会-萨克莱和INFN-LASA将前往KEK现场参与套管工序，并跟进HPGS鉴定活动、腔串组装操作和低温模块测试活动。

其余两台腔体将在欧盟工业场址进行套管加工，以此展示其交付符合 HPGS 要求、可“直接用于腔串组装”的腔体的能力；Eu-XFEL 和 ESS 等项目已成功实现这一目标。套管加工后，将在 2 K 下测试腔体，以评估其性能并验证套管工序的质量。尽管这两台腔体可能不会安装在 ITN 低温模块中，但其套管加工步骤对于验证工业化路径至关重要（见第 2.1.2.1 节）。在此阶段，CEA-Saclay 和 INFN-LASA 将为欧盟工业合作伙伴提供技术支持，确保整个过程严格执行质量控制（QC）。

九单元腔体相关活动于 2025年1月 正式启动，ITN-EU 和 KEK 联合专家组每周举行会议，致力于制定 HPGS 和技术规范。制定九单元裸腔的技术规范时，既考虑了 HPGS 要求，也考虑了欧盟境内制造的限制，包括套管加工以及相关的质量控制计划。与此同时，该团队还确定了实现国际直线对撞机性能目标的最佳表面处理和退火工艺，并参考了 KEK、费米国家加速器实验室、DESY 及其他合作实验室取得的研发成果。

这项合作促成了招标技术规范的编制，用于为 KEK 机械加工两台九单元裸腔；该招标于2025年7月授予 RI。在此成功基础上，目前正在最终确定的四台 IT N-EU 腔体招标将采用与 KEK 相同的技术规范，包括表面处理和退火处理要求。裸腔招标流程结束后，将立即着手制定夹套规范。

HPGS 规范与压力容器规范协调 该流程由 KEK 牵头，并与日本高压气体安全协会（KHK）及茨城县有关部门密切协作。日本高压气体制冷安全（HPGS）法规规定的所有要求均已纳入相应的技术规范。这些要求包括材料可追溯性、壁厚测量，以及代表性焊缝样品的力学测试等。

根据当前计划，氦夹套焊接完成后，将在 KEK 进行压力试验。对于 ITN-EU 的相关工作，目前正在考虑由符合资质的欧盟工业合作伙伴进行压力试验，采用其他大型项目（如 Eu-XFEL、LCLS-II、ESS 和上海硬X射线自由电子激光装置）成功实施过的方法。在这种情况下，试验将遵循日本 HPGS 要求，采用相当于最大允许工作压力（MAWP）1.5 倍的气体压力。

图8示出了带夹套的九单元腔体的示意图，展示了材料、相邻腔体之间的波纹管连接、氦槽以及两相管。

2.1.2 低温模块设计（WPP-2）

2.1.2.1 描述

WPP-2涉及低温模块的设计。

这需要采用基于国际合作制定的通用设计规格、适用于高压气体的设计。国际直线对撞机低温模块包含 8–9 个超导射频腔，并像欧洲X射线自由电子激光项目中那样，将它们串联起来，中间不设常温区段 [7]。低温模块在液氦温度下构成主要热负荷，因此在整体低温系统优化中发挥着重要作用。设计理念是使用大型低温制冷站为长达数千米的低温单元制冷。每个长 12.652 米的低温模块包含九个腔体（A 型），或八个腔体和一个超导四极磁铁组件，并配有水平和垂直偶极校正磁铁，以及安装在低温模块中心的束流位置监测器（BPM）（B 型）。腔体和四极磁铁组件与支撑结构、热屏蔽和绝热层一起装入低温模块中；模块还配备了所需的所有低温管道，以便沿低温单元分配冷却剂流量，而无需额外设置外部低温分配管线。国际直线对撞机低温模块设计是在最初为 TESLA 测试设施（TTF）开发的模块基础上更新而成，

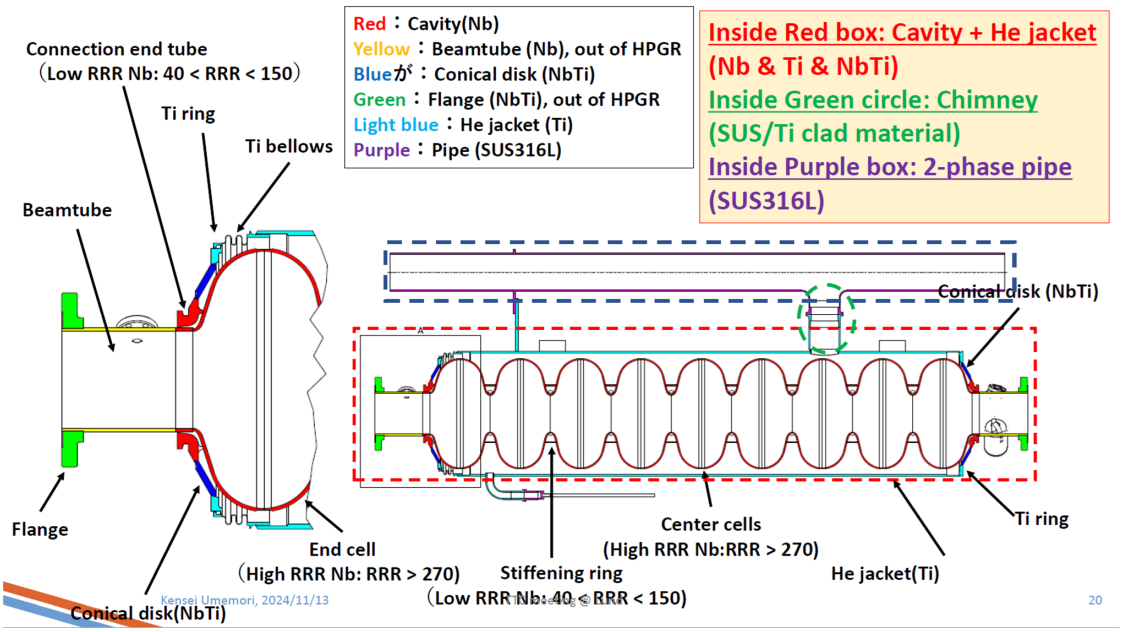


图8：展示处于套管配置中的ITN腔体的示意图。

该模块由 INFN 和 DESY 合作开发，并应用于欧洲X射线自由电子激光项目 [8]。随后，费米国家加速器实验室针对国际直线对撞机技术设计报告进一步优化了国际直线对撞机的工程设计 [1]。

将四极磁铁组件置于低温模块中部的设计，使得可为所有主直线加速器低温模块定义标准互连接口。基模功率耦合器向腔体提供射频功率，并在一侧连接到真空容器上的端口。射频电缆将场拾取器和高阶模天线的信号传送至低温模块外部的低电平射频控制系统，以控制腔场幅度和相位，并从2 K温区提取高阶模功率。洁净室装配所需的手动阀门在模块两端终止束流管。

横截面中最大的部件是一根直径300 mm的氦气回流管（GRP），它可在沿低温串列的压降可忽略不计的条件下回收氦蒸气的质量流，以保持温度稳定性。它作为结构主干，用于支撑束线元件串列。氦气回流管由三根复合支柱从顶部支撑，这些支柱来自室温环境的热传导很小。中心支柱固定在真空容器上，而其余两根立柱具有横向柔性，并可在法兰上滑动，以便在热循环期间允许氦气回流管相对于真空容器发生纵向收缩/膨胀。

2.1.2.2 现状

在亚洲，日本参与 WPP-2，计划承担设计、制造、组装和测试工作 [9]。此外，除低温模块外，输入耦合器[10], 频率调谐器、磁屏蔽和超导磁体的设计、制造、组装和测试也在推进中。另外，目前正在开展提高洁净室工作效率（例如引入机器人技术）和低温容器消磁方面的研究。

低温模块 如上所述，基于 2013年发布的技术设计报告，低温模块的重新设计三维模型已完成 [11]。国际直线对撞机技术设计报告的主要修改包括移除 5K辐射热屏、增设频率调谐器检修口，以及调整磁体电流引线端口。制造计划于 2025—2026财年进行，组装计划于 2027财年完成。下图图9展示了已完成的三维模型。

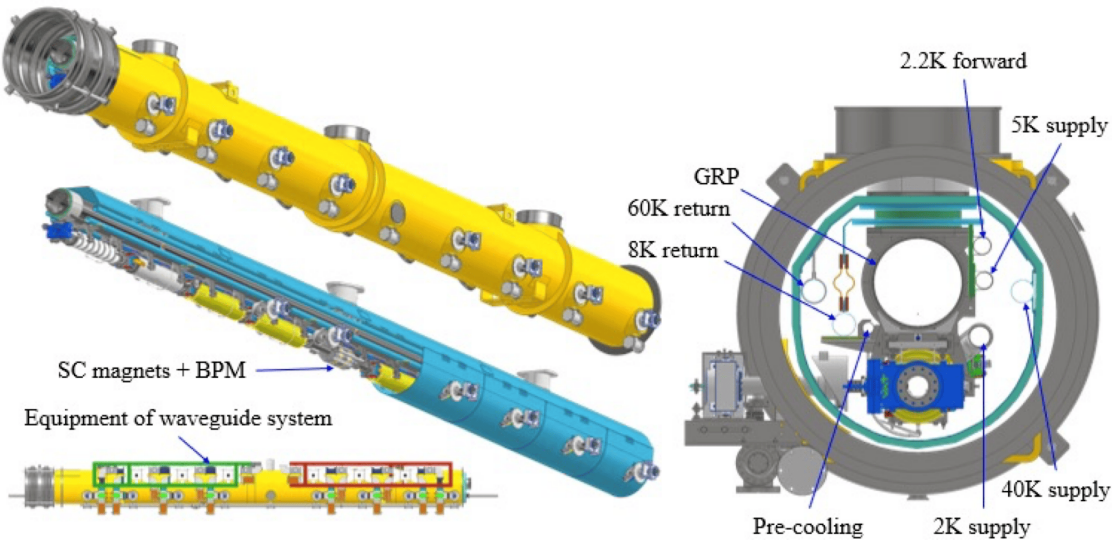


图9：完整的低温模块三维模型。

输入耦合器尽管输入耦合器的设计以 TTF 和 Eu-XFEL 的设计为基础 [12], ，但在美日合作期间，其设计和制造过程中进行了多项修改。原型输入功率耦合器已于2025年完成并通过测试。KEK正在准备采购8个正式功率耦合器的合同。这些耦合器将于2026—2027年制造并测试。高功率测试完成后，它们将安装在低温模块中。图10展示了原型输入耦合器以及用于高功率测试的组装件。

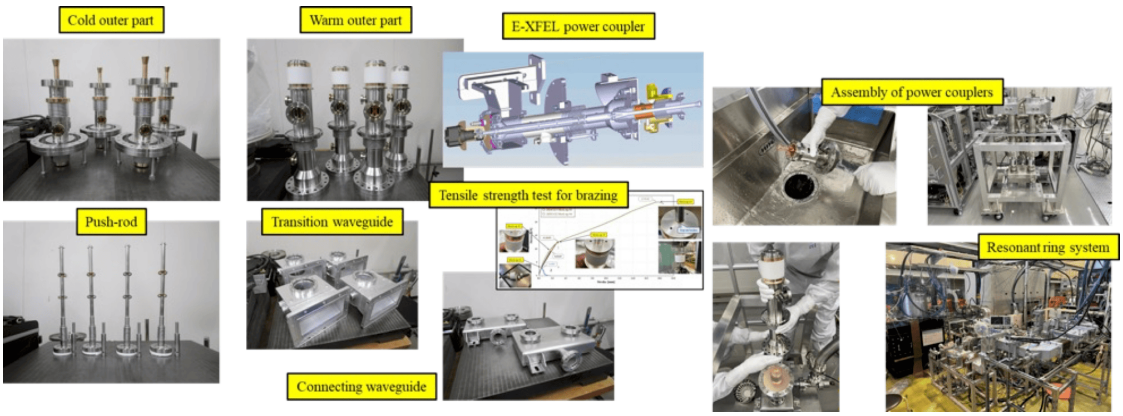


图10：四个已完成的联轴器。

频率调谐器频率调谐器将采用 LCLS-II 的调谐器[13]。在美日合作期间，FNAL寄送了一组腔体和调谐器，并由FNAL工作人员开展了组装、测试和评估培训。针对高加速梯度下存在问题的洛伦兹力致失谐，也已完成演示测试（在室温条件下进行）。原型调谐器已制造完成，并进行了类似测试。电机和压电元件的选型现已完成，低温测试正在进行中 [14]。图11展示了调谐器驱动测试的模拟结果、洛伦兹力造成的机械变形，以及低温测试的准备情况。

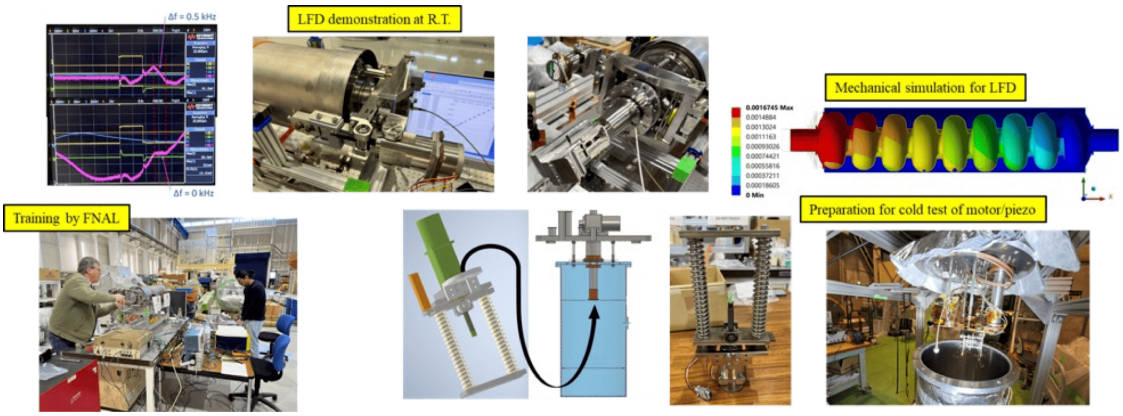


图 11：调谐器驱动测试的模拟结果。

磁屏蔽与退磁 磁屏蔽的基本设计已完成，原型也已制造完成。该原型已进行配合检查，以确认不会与调谐器发生干涉。目前正在进行实际装置的初步生产 [15]。评估完成后，将开始生产八台装置。图 12 展示了使用原型屏蔽罩进行的配合检查，以及使用模拟容器进行的退磁测试。

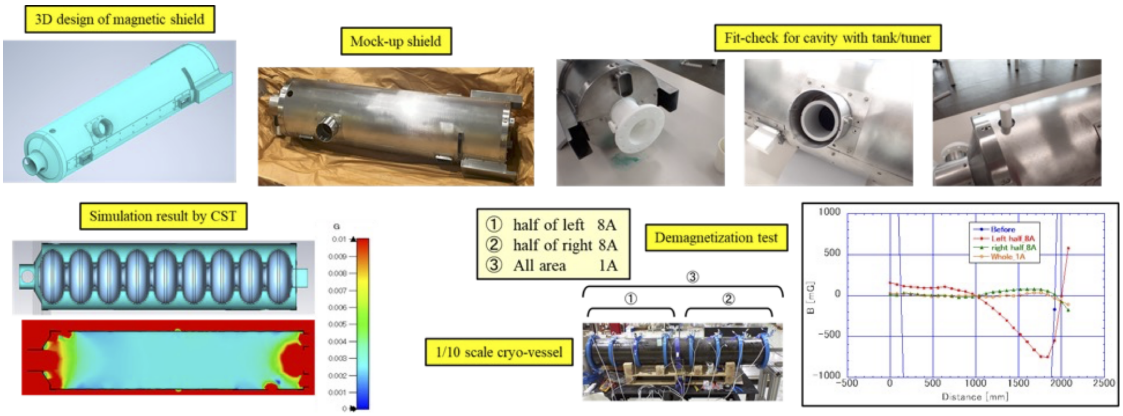


图 12：磁屏蔽原型测试。

关于低温容器绝热层的退磁，使用模拟容器进行的测试已完成，实际尺寸容器的测试已列入计划。

超导磁体 该超导磁体计划在2024财年至 2026 [16] 期间的三年内完成制造和测试

[17]。铌钛线圈预计将于2025财年完成。组装后，将在冷却测试期间进行性能评估。用于评估的绝热层已制造完成，传导冷却系统也已安装。图13展示了正在制造的线圈、已完成的测试低温恒温器，以及漏磁场的模拟结果。

CIEMAT 也采用铌三锡超导体开展了另一种补充性开发方案。该方案旨在进一步提高可持续性，以吸收高电场在超导射频腔表面引发的场发射电子流所造成的热沉积。基本设计已经完成，线圈制造的研发工作正在进行。下一步将开发模型磁体[18, 19]。

西班牙的 IFIC 正在开展 ILC 主直线加速器束流位置监测器（束流位置监测器）的研发工作。空间分辨率小于 1 微米、时间分辨率小于 500 纳米的高精度束流位置监测器是一项关键要求，同时还必须与超导四极磁铁 [20], 实现极其精确的对准。因此，KEK 与 IFIC 正在密切合作，尤其是在接口方面。采用铁轭主导型四极磁铁的当前超导四极磁铁设计应能满足可靠、稳定对准的要求。组装测试预计将在 2026—2027年进行。

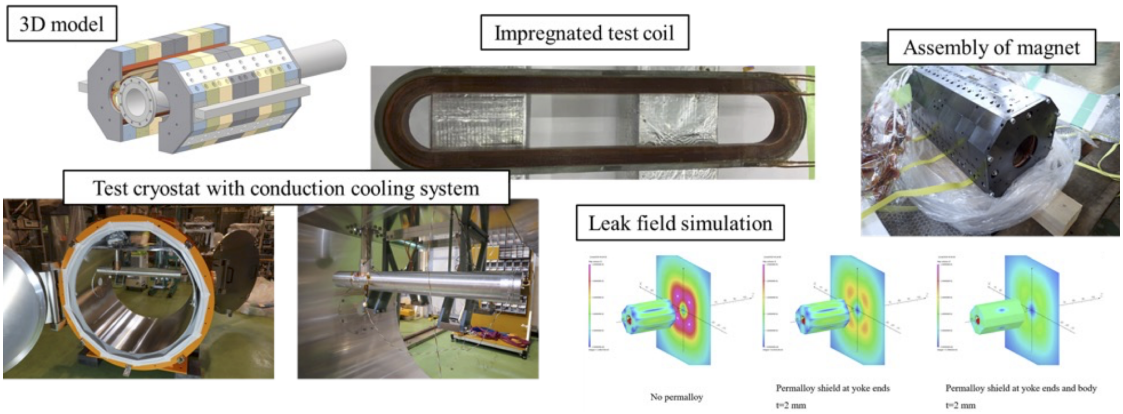


图13：磁屏蔽原型测试。

洁净室运行与机器人应用 洁净室相关工作主要包括为空心弦操作准备必要的夹具。洁净室内已安装导轨。接下来将制造并引入用于安装空心弦的立柱。空心弦所需的真空部件（连接波纹管、洁净闸阀）也正在进行测试。

关于机器人，已引入一台设备，并已完成自动清洁和组装的演示测试。远程控制系统目前正在建造中，同时也在并行筛选最合适的末端执行器（末端执行器或工具头是机械臂末端用于与环境交互的装置）。之后计划开展使用腔体的机器人研究，并演示输入耦合器安装。图14展示了洁净室相关工作和机器人的引入。

时间表 我们将在2026—2027年制造一台低温模块。同时，将制造四种辅助部件（功率耦合器、频率调谐器、磁屏蔽、超导磁体），并评估其独立性能。腔串组装和低温模块组装将于2027年启动。低温模块建造完成后，将分两个阶段进行冷却测试：第一阶段为低功率测试，

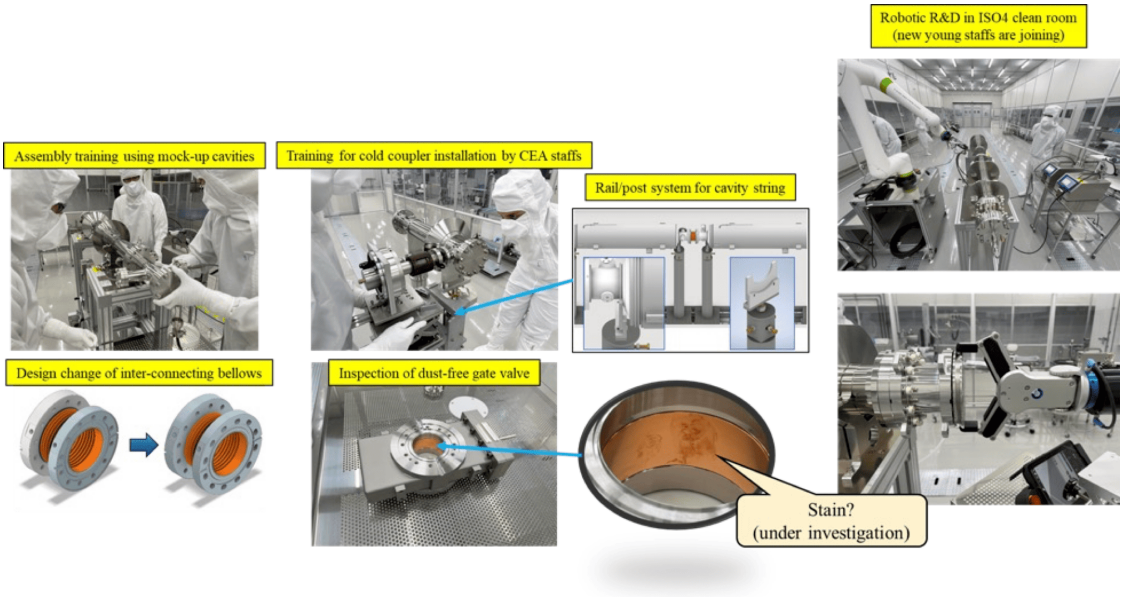


图14：洁净室及其中开展的工作。

随后进行高功率测试。在高功率测试中，将把腔体的性能与垂直测试中的性能进行比较。

2.1.3 蟹形腔（WPP-3）

2.1.3.1 描述

国际直线对撞机（ILC）需要使用蟹形腔系统，以抵消相互作用点（IP）处14 mrad的交叉角，从而确保最佳亮度。这些腔体可使粒子束团横向旋转，使其对准并实现正面碰撞。ILC的基准能量为250 GeV，并可扩展至1 TeV [21]。自2021年以来，ILC国际发展团队（IDT）旗下的全球联盟已开发出五种蟹形腔设计，以满足严格的射频和机械规范 [22], ，最终通过筛选过程确定最具前景的技术进行原型制作。

蟹形腔必须安装在紧凑的低温模块空间内，其纵向长度为3.85 m，横向尺寸为0.198 m（见图15）。射频参数针对三种工作频率进行了定义：1.3 GHz、2.6 GHz和3.9 GHz，主要设计约束包括：

- 峰值电场（Ep）： ≤ 45MV/m
- 峰值磁场（Bp）： ≤ 80mT
- 束流管孔径： ≥ 25mm
- 偏转电压：在 1 TeV 运行时最高可达 7.4 MV
- 高阶模阻抗阈值和对准公差

3.9 GHz 跑道形腔 该腔由兰卡斯特大学和英国科学技术设施委员会开发，最初基于九单元椭圆形设计[1], ，后经重新设计，以缓解同阶模（SOM）和低阶模（LOM）带来的问题。采用跑道形几何结构，以改善模式分离并降低 Bp。双腔

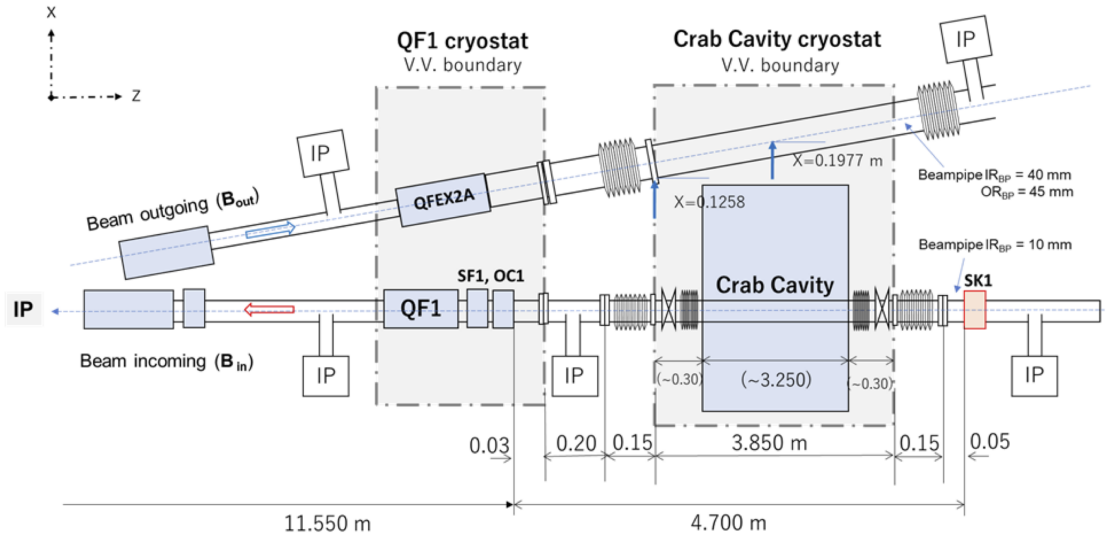


图 15：国际直线对撞机蟹形腔相互作用点位置

版本优化了孔径和高阶模阻尼（图 16-a），实现了对不需要模式的有效抑制，并具有良好的机械稳定性。

1.3 GHz 射频偶极腔（RFD）由老道明大学和 JLab 开发，该射频偶极腔（图 16-b）工作于类 TE11 模式。因其简单有效而选用了单腔设计[23], ，类似于为高亮度大型强子对撞机[24], 和电子-离子对撞机[25]开发的设计。它采用 TESLA 式高阶模耦合器 [26]，并满足 125 GeV 和 500 GeV 运行的阻抗阈值。机械分析表明应力水平可接受[27], ，制造将采用中晶粒铌（MG Nb），以提高成本效益和均匀性。

1.3 GHz 双四分之一波腔（DQW）由布鲁克海文国家实验室和欧洲核子研究中心开发，改编自高亮度大型强子对撞机[28] 和电子-离子对撞机[29] 的设计，该双四分之一波腔（图 16-c）具有超紧凑几何结构和优异的表面场强与偏转电压比。125 GeV 运行需要 2 个腔体，500 GeV 运行需要 6 个腔体。高阶模与基模分离良好，可采用简单的阻尼方案。集成研究表明，在国际直线对撞机的空间限制内具有可行性。

1.3 GHz 宽开口波导腔（WOW）由布鲁克海文国家实验室开发的 WOW 腔体（图 16-d）通过大直径束流管将高次模泄漏出去，同时俘获基模。这样可使阻尼器与腔体解耦，从而简化制造[30] 。研究人员提出了一种波导-同轴阻尼器设计，仿真结果确认其符合阻抗符合性要求并具有机械稳健性。一个配备 5 个 WOW 腔体的低温模块能够安装在可用空间内。

2.6 GHz 准波导多单元谐振器（QMiR）由费米国家加速器实验室开发，QMiR（图 16-e）采用开放端部和集成式束流真空腔室，无需专用高阶模耦合器。早期技术原型在测试中实现了 2.6 MV 的横向偏转[31]。该设计经过改造，以满足国际直线对撞机的要求，孔径为 25 mm，频率为 2.6 GHz。模拟证实了其高阶模抑制能力和机械调谐性。低温模块设计符合国际直线对撞机要求[32]。

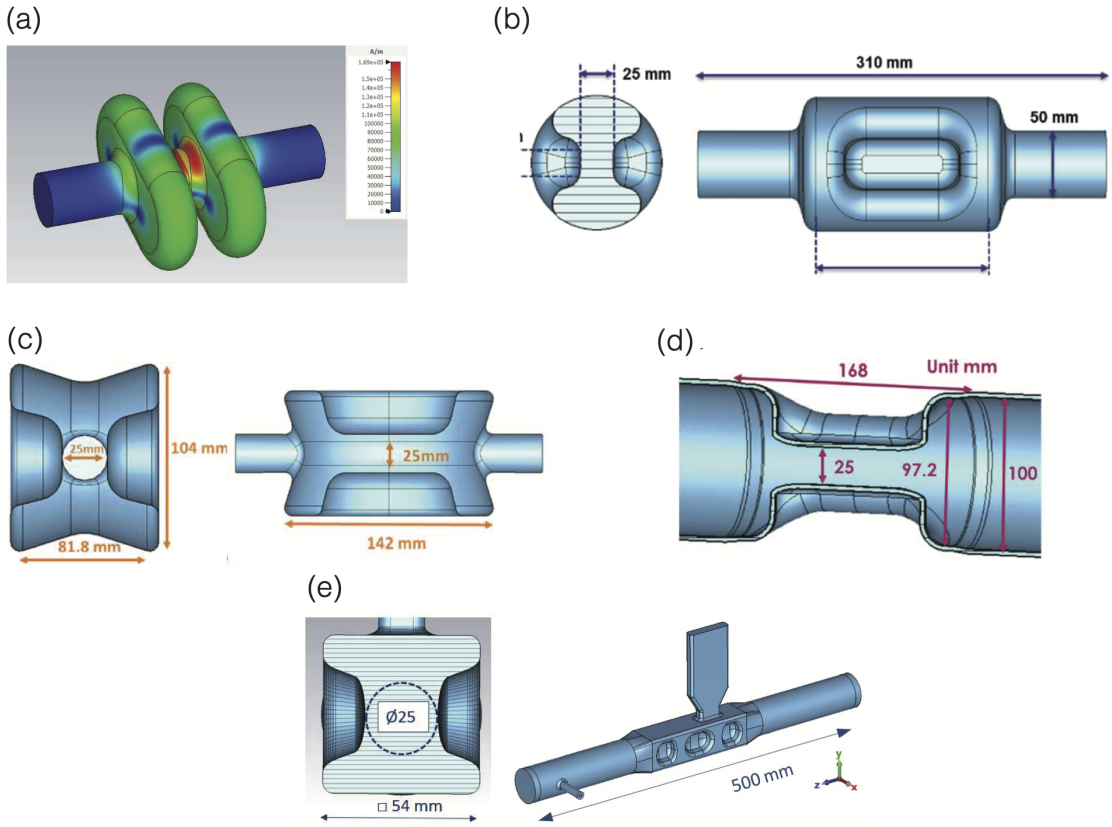


图16：不同的蟹形腔设计：(a) 双腔 3.9 GHz 跑道型蟹形腔，(b) 1.3 GHz 射频偶极腔（RFD），(c) 1.3 GHz DQW 蟹形腔，(d) 1.3 GHz WOW 蟹形腔，(e) 2.6 GHz QMiR 蟹形腔。

铌材料考量国际直线对撞机蟹形腔制造考虑采用三种类型的铌[33][34][35]:

- 细晶粒（FG）：均匀，但成本高，且轧制工艺中容易受到污染。
- 大晶粒（LG）：洁净，但机械性能不一致。
- 中晶粒（MG）：洁净，机械性能均匀，且成本较低。

由 KEK、JLab 和 ATI 合作研发的中晶粒铌，被认为是兼顾性能和可制造性的首选方案。

筛选结果 2023年4月，KEK 举行了一次评审，根据合规性、成熟度、高次模抑制、射频辅助设备、机械稳定性、可制造性和集成可行性[36]对全部五种设计进行了评估。最终选定用于原型制作的两种设计如下:

- 1.3 GHz 射频偶极腔（RFD）– 老道明大学/JLab
- 2.6 GHz 准波导多单元谐振器 – 费米国家加速器实验室

2.1.3.2 现状

ILC偏转腔研发已成功将范围缩小至两项颇具前景的技术：**射频偶极腔**和**准波导多腔谐振器**,

已准备好进行原型制作和验证。这些设计满足国际直线对撞机在其能量范围内的运行需求，并为未来实施提供可扩展且经济高效的解决方案。下一步是制作原型并评估腔体，目前正等待具备专业知识和资源的研究机构参与其中[1]

[1]目前，欧洲核子研究中心与英国科学技术设施委员会（英国）正在讨论基于 ODU 概念设计的 RFD 螃蟹腔原型制作协议。

2.2 电子源与正电子源领域

2.2.1 电子源（WPP-4）

2.2.1.1 描述

国际直线对撞机技术设计报告中极化电子源的基线设计包括驱动激光器、200 kV直流高压光电枪，以及可提供极化度 >85%的砷化镓/磷砷化镓光阴极。因此，WP4由这三个组成部分构成。其中，光电枪是最为紧迫的项目。

杰斐逊实验室一直在研制两支国际直线对撞机原型枪。它们将满足技术设计报告的要求，可在光阴极处利用直径为1 cm的激光，在1 nsec的脉冲持续时间内提供4.8 nC的束团。

然而，过去10年的经验促使对国际直线对撞机枪技术设计作进一步改进。基于反向绝缘体几何结构，已在以下方面取得改进：

- 高电压三重点结区，在保持最大梯度为 < 10 兆伏/米的同时实现更高的工作电压，以防止场致发射；
- 阴极-阳极几何结构，以抑制加速间隙内的非对称电场，从而抑制束流偏转和像差；以及
- 真空设计，以实现极高真空并限制离子反向轰击，这是延长光阴极量子效率（QE）寿命所必需的。

此外， >200 kV 的电子枪电压有望显著提升性能。短于 1 ns 的激光脉冲长度或可降低对次谐波聚束的要求。由于电离截面会随电子束能量增加而迅速减小，离子反向轰击导致的 QE 衰减也会减轻，从而带来额外益处。

WP4 在前两年拟开展的工作包括：

- 对短于 1 ns、峰值电流更高的束团进行束流动力学模拟，以确定允许的初始纵向和横向激光脉冲形状，
- 一种静电设计，可在 $\sim$300 千伏工作电压下使光阴极处的梯度最大化，同时将电极表面的梯度限制在 < 10 兆伏/米。

- 一种三重点结屏蔽设计，使倒置绝缘体上的电势趋于线性。

- 一种倾斜偏置阳极设计，用于校正由绝缘体产生的不对称静电场。

- 通过真空建模实现 $< 2 \times 10^{-12}$ 托的静态真空，并且
- 一种偏置阳极设计，可限制反向轰击进入阴极阳极间隙，从而延长光阴极的使用寿命。

2.2.1.2 现状

高压绝缘体和光阴极领域取得了进展。

- 商用绝缘体的开发（KEK、京瓷和JLAB）[37]紧凑型倒置绝缘体非常适合通过电缆将光阴极电子枪连接到高压电源。与圆柱形绝缘体相比，这种设计减少了暴露于高电压下的电极表面积。KEK 获得了资金，委托京瓷制造一种低二次电子产额的测试绝缘体，该绝缘体将在 JLAB 进行高压测试。

- 应变GaAs/GaAsP阴极的开发（ODU（老自治领大学）和JLAB）[38] 采用MOCVD（金属有机化学气相沉积）成功生长出有应变GaAs/GaAsP阴极，分别制备了带DBR（衍射布拉格反射器）和不带DBR的样品。获得了 >90%的极化，量子效率分别为 >1%（不带DBR）和 >2%（带DBR）。使用直径为8毫米的激光，束团电荷达到9 nC。（见图17左图）
- 采用分子束外延（MBE）生长应变AlGaAs/InAlGaAs阴极。（UCSB 和 JLAB）[39]与 GaAs/GaAsP 相比，InAlGaAs 的潜在优势在于供应商选择更多，并且应变（极化）和带隙（波长）可独立控制。最佳结果显示极化为 88±4% ，量子效率为 0.95%。（见图 17 右图）

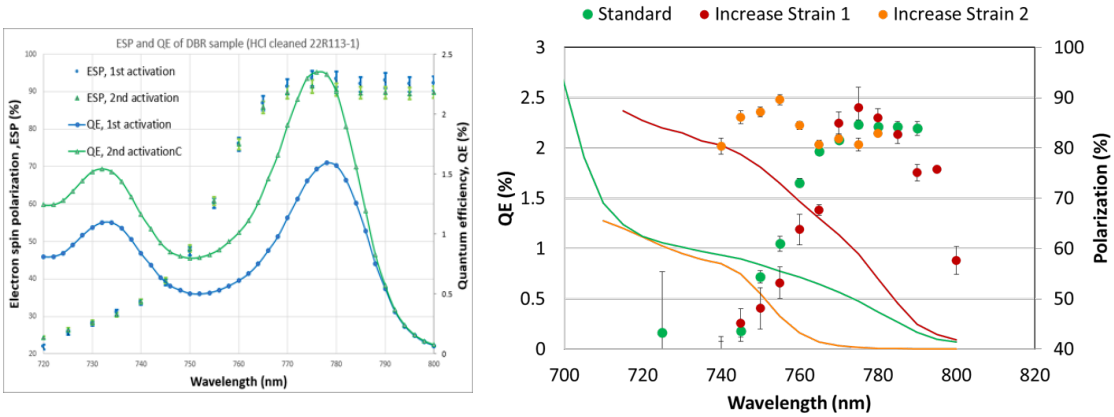


图 17：左：采用 DBR 的 GaAs/GaAsP 阴极的极化和量子效率。量子效率：2.3%，极化：780 nm 时为 92%。右：AlGaAs/InAlGaAs 阴极的极化和量子效率（红点）。

2.2.2 波荡器方案正电子源（WPP-6/7）

2.2.2.1 描述

概述 基于波荡器的正电子方案可提供成熟可靠的正电子源，其接收度相对于阻尼环接收度有较大余量，完全满足国际直线对撞机要求。基线方案由一台有效长度为 231 m 的波荡器和一束能量为 126.5 GeV、频率为 5 Hz 的电子驱动束组成；该束流还可支持 10 Hz 运行，以实现高亮度。

计划采用一种特定的 GigaZ 运行模式，其重复频率为 3.7+3.7 Hz [46] 。基于波荡器的正电子源能够产生极化正电子，具有重要的物理学影响，可显著控制系统误差、改善统计结果，并提供只有在电子束和正电子束同时极化时才能观测到的额外新观测量 [47]。

ITN 中的两个主要工作包是 WPP-6“旋转靶”和 WPP-7“磁聚焦”。一个直径为 1 米的轮盘以 2000 转/分钟的速度旋转（即切向速度为 100 米/秒），并通过辐射冷却至固定的水冷冷却器（见图 18）。由于束团串长度较长，需要使用光学匹配装置（OMD），其平顶脉冲宽度需与之匹配（1312 个束团时为 0.726 毫秒）。因此，现有的磁通集中器无法使用。作为替代方案，计划采用脉冲螺线管（见图 19），产生半正弦电流

脉冲，脉冲宽度约为 4 毫秒，靶处的峰值场为 3–5 T（见图 19 和图 20）。该设计可实现产额 Y≥ $1.5e^+/e^-$ （见表 4） [48]。

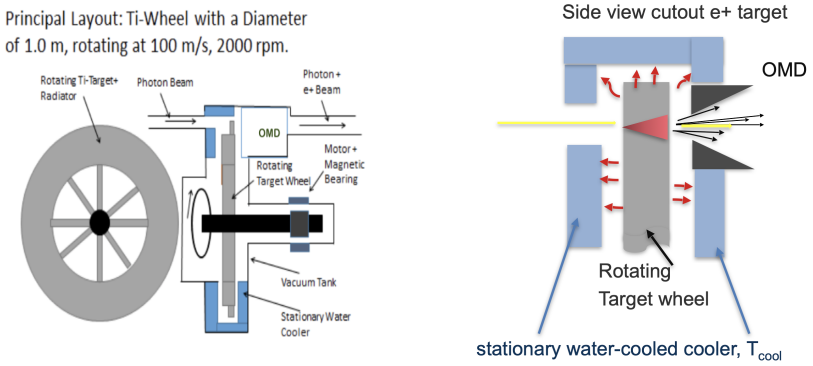


图 18：靶轮装置概览：在真空中旋转；由磁轴承支撑；嵌入固定式水冷器中（左图）；靶缘细节图，显示光子束击中靶轮的位置（右图）。

文中还讨论了一种主动等离子体透镜 OMD——它能在等离子体中产生锥形方位磁通量，是一项新颖的应用，在进一步提高产额和收集高度发散的正电子方面潜力巨大。汉堡大学正与 DESY 合作研制一款缩小尺寸的锥形等离子体透镜原型，相关成果也将在 ITN阶段内完成。

然而，源的效率也在很大程度上取决于波荡器设计和靶材料的性能。在上述所有主题方面都已取得决定性进展。

波荡器设计 目前，XFEL 已积累了约 10 年使用长平面波荡器的运行经验，包括在 200 米波荡器长度范围内实现稳定运行，束流对准精度达 10–20 微米 [46]。每 6 个月重新测量一次。束流运行期间，通过慢速和快速反馈系统，束流轨迹的控制精度均优于 3 微米。由于自由电子激光对光子束的要求，XFEL 的束流要求甚至比国际直线对撞机更加严格。国际直线对撞机的波荡器为螺旋式，K 值约为 0.92。已开展包含非理想场和失准情况的模拟。为保护波荡器壁免受同步辐射吸收影响，已设计掩模系统（图 21） [50], , 如图 22 所示。

靶材料性能 入射光子的能量约为 7.5 MeV（一次谐波），每隔 7–8 s 击中靶上的同一位置，即约每 5000 h 发生 5×10^6 次载荷循环。对于 250 GeV 的 CMS 运行，靶

OMD	Positron Yield @Capture (|z| < 7mm)	Positron Yield @Damping Ring
Quarter-Wave-Transformer	1.07	~1.1
Pulsed Solenoid without shielding	1.81	1.91
Pulsed Solenoid with shielding	1.64	1.74

表 4：基于波荡器的正电子源采用不同光学匹配装置时的预期正电子产额，包括四分之一波变换器（QWT）和有/无铁氧体屏蔽的脉冲螺线管 [48]。

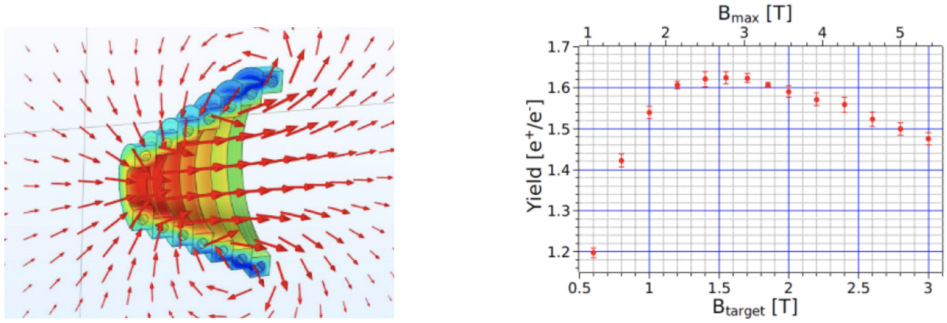


图19：脉冲螺线管场，半正弦电流脉冲持续4 ms，峰值电流为50 kA，峰值场为5.3 T。表面：磁通密度模（T），箭头体：磁通密度（空间坐标系），由COMSOL Multiphysics代码生成（左图）；预期正电子产额取决于靶出口处的磁场 B_{target} 以及最大场 B_{max} （右图） [48]。

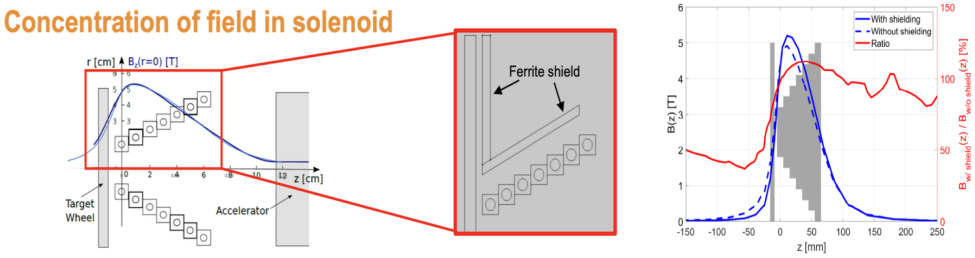


图20：脉冲螺线管内部的铁氧体屏蔽，使用COMSOL进行的二维和三维仿真，包含旋转靶（100 m/s）以及峰值电流45 kA（左图）。有屏蔽与无屏蔽时的所得磁场。采用屏蔽后，感应热和峰值力均降低至原来的二分之一以下，峰值场略有升高，增幅为 $B_z = 10\%$（右图） [48]。

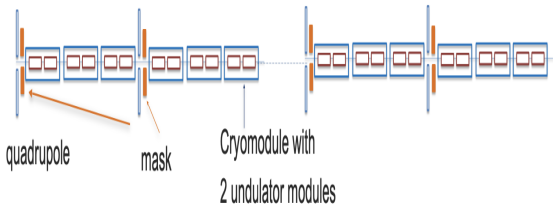


图 21：掩模系统的设计，用于保护波荡器壁，并将入射光子功率（包括次级粒子）控制在可接受限值 1 W/m 以下 [46]。

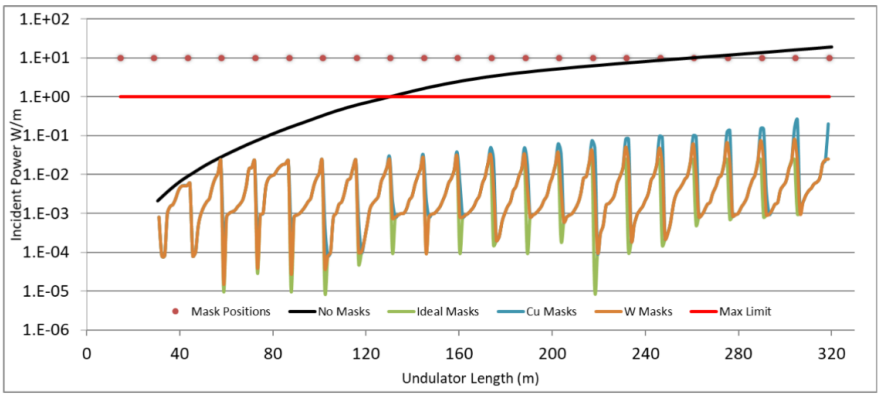


图 22：为保护 ILC250 波荡器壁而采用掩模的效果（假设允许限值为 1 W/m（红线））。使用了铁、铜、钨等不同材料 [46]。

预计采用厚度为 7 mm（0.2 个辐射长度）的 5级钛合金。预计每个脉冲的温度变化为 $\Delta T_{\max} = 60$-120 K。因此，预计最大能量沉积约为 60 J/g，材料上的有效脉冲长度约为 25-55 μs，有效重复频率为 0.17 Hz，由此每年的每原子位移数（每原子位移数）约为 0.3-0.5 [52]。

WPP-6：旋转轮设计 直径为 1 m 的钛靶轮以 2000 rpm 的转速旋转，主要由两个部件组成：通过辐射进行冷却的系统，以及由磁轴承带动的旋转系统。磁轴承是用于支撑在真空中旋转部件的标准部件，可在无需大量维护的情况下，以高转速长期运行。整个系统密封在一个超高真空罐中。沉积的热功率约为 2 kW，并集中在靶的边缘附近。因此，热沉积可通过热辐射，从旋转靶传递至静止的水冷铜冷却器 $T^4_{\text{radiator}} - T^4_{\text{冷却器}}$，使温度保持在 $T_{\text{ave}} < 460^0$ C。

在 ITN 工作包 WPP-6 中，计划绘制机械图纸，并完成整个轮系的最终工程设计。汉堡大学计划与 DESY 和欧洲核子研究中心合作，对部分模型和缩小比例的原型进行测试。

WPP-7：磁聚焦系统脉冲螺线管：采用铜脉冲螺线管产生持续 4 ms 的半正弦电流脉冲，可实现与约 1 ms 平顶脉冲的匹配，使得半正弦脉冲达到峰值时，

#	Target A	t_A (μm)	w_A (mm)	Beam Pulse Δl (ms)	L (ms)	Rad. Damage (dpa)	Charge $\delta Q/\delta t$ (μC/s)	δQ_p (nC)	Q (C)	Temp. $T_{Avg.}$ (°C)
1	Ta	100	3	0.40	3.7	0.07	5.4	20	0.107	516
2			10	1.10	5.0	0.27	11.	55	0.420	516
3	Ti6Al4V-ELI	500	10	1.10	5.0	0.38	11.	55	0.147	862
4	Ti6Al4V-ELI	750	10	0.50	7.1	0.17	3.5	25	0.063	—
5				1.00	10.	0.38	5.0	50	0.144	—
6	Ti6Al4V-Gr5	500	14	0.50	7.1	0.18	3.5	25	0.070	274
7				1.00	10.	0.40	5.0	50	0.153	392
8	Ti6Al4V-Gr5	750	14	0.50	10.	0.50	2.5	25	0.191	253
9	W	100	3	0.40	3.7	0.07	5.4	20	0.117	257
10			10	1.10	5.0	0.23	11.	55	0.360	428

表 5：材料辐照规范：将不同成分（A）、厚度（t_A）和宽度（w_A）的正电子源候选材料暴露于电子束下：钛合金、纯钽和纯钨 [52]。

涡流已消退，并能在整个束流脉冲期间获得稳定的磁场。要实现多特斯拉磁场，需要约 50 kA 或更高的峰值电流。脉冲期间，靶上会产生热负荷，并对旋转靶产生作用力。在脉冲螺线管内加装铁氧体屏蔽只能略微降低峰值磁通，但能显著减少热负荷（减少一半以上）以及旋转轮所受的峰值力。加装此类铁氧体屏蔽后，通过 COMSOL 进行的二维和三维仿真已实现约 $Y = 1.7$ 的产额。

在 ITN 工作包 Wpp-7 中，脉冲螺线管原型的制造和测试由汉堡大学与 DESY 合作开展。计划在欧洲核子研究中心和 DESY 进行最终测试，测量 1kA（脉冲和直流）以及 50kA 下的磁场；50kA 测量既采用单脉冲模式，最终还将以 5 Hz 的频率施加持续时间为 5ms 的脉冲。

2.2.2.2 现状

目前参与基于波荡器的正电子源项目的研究所和实验室包括：欧洲核子研究中心、DESY、汉堡大学、盖斯特哈赫特 Helmholtz-Zentrum Hereon、约翰内斯·古腾堡美因茨大学、美因茨亥姆霍兹研究所、SKF Magnetic Bearings Canada、巴黎萨克雷大学奥尔赛校区、托马斯·杰斐逊国家加速器装置（美国纽波特纽斯）。

概述 迄今取得的成果和正在开展的研发工作表明，基于波荡器的正电子源能够满足国际直线对撞机正电子源的要求。ITN 工作包主要涉及工程问题，而原型测试工作需求非常迫切，以确保部件能够按时就绪。国际直线对撞机 ILC250 的波荡器设计已经完成，靶测试表明靶能够承受相应载荷，见表 5：即使在达到预计年度 PEDD 数倍的情况下，靶也未出现任何材料损伤。此外，采用所选的 5级钛合金靶材料后，实现亮度升级也是可行的。

关于 ITN 工作包：a) WPP-6 旋转轮和 b) WPP-7 磁聚焦系统，预计很快将完成合适的原型测试设计，并对首批（缩小尺寸的）聚焦系统原型进行测量。已建立磁轴承方面的行业联系。

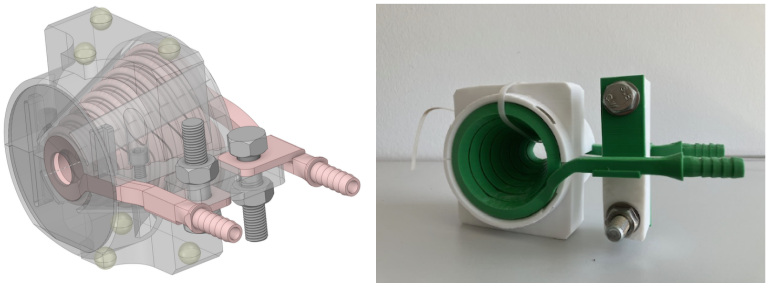


图 23：采用 8 匝绕组、金属支撑桥和绝缘支撑杆的锥形螺线管线圈设计（左图）。脉冲螺线管设计的 3D 打印测试模型（右图）。

脉冲螺线管的工程设计与原型状态已完成脉冲螺线管设计的机械图纸和CAD图纸。要实现 5 特斯拉的磁场，需要 50 kA 或更高的峰值电流。已使用 COMSOL 对钛板以 100 m/s 的速度移动和不移动两种情况进行了详细的二维和三维仿真，峰值电流为 45 kA。采用铁氧体屏蔽可使感应热负荷降低一半以上，但对峰值磁场的降低幅度很小。

已对以脉冲螺线管作为 OMD 的基于波荡器的光源进行模拟，计算其产额直至阻尼环（DR）。结果表明，与采用四分之一波变压器（QWT）作为 OMD 相比，产额显著提高（见表 4）。

还对脉冲螺线管线圈中的应力进行了模拟。峰值磁通为 4.6 T 时，预计平均功率约为 10 千瓦。线圈中的冯·米塞斯应力约为 570 兆帕，可为预期应力提供一个保守估计。然而，铜的软态抗拉强度约为 200 兆帕。线圈中的实际应力对具体形状非常敏感。因此，包括螺线管、支撑结构和连接件在内的机械设计仍需进一步迭代。即使应力过高，也可以找到解决方案，例如采用多层结构或降低峰值电流。

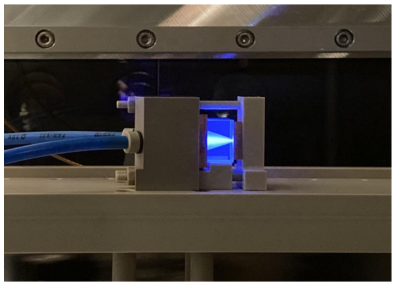
因此，全局优化仍未完成，正等待脉冲螺线管设计原型的首批结果。此类原型的机械图纸最近已完成（见图 23 左图）。它由一个带锥形平面绕组和互连结构的螺线管线圈组成。

在 ITN 初期工作期间，已通过 3D 打印制作了首批缩小尺寸的原型（见图 23 右图）。一个铜制原型已下单，目前正等待交付，随后将进行首批测量。

已开发出一种自动化专用仿真代码，可对参数化螺线管几何结构进行贝叶斯优化。这些几何结构通过 COMSOL 进行模拟，以生成磁场分布，随后利用这些分布追踪正电子穿过初始加速器结构。最终目标是根据原型测量结果改进螺线管的形状，以最大限度提高正电子产额。

OMD 原型主动等离子体透镜 已对一种用作光学匹配装置的国际直线对撞机主动等离子体透镜四分之一比例原型进行了仿真、制造和运行测试（见图24左图）。实验测试仍在进行中。运行约90分钟后观察到了等离子体放电。不过，其确切来源仍不清楚。目前正在研究不同电极材料（例如钨铜）在不同压力等条件下的表现（见右图

图 24 [51]。



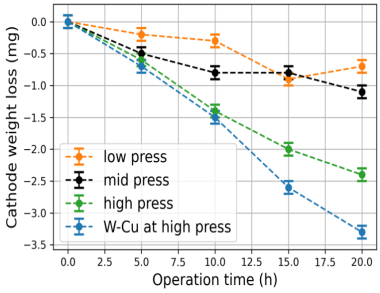


图24：运行中的缩小版国际直线对撞机主动等离子体透镜（左图） [51]；不同压力条件和不同材料下的电极侵蚀（右图） [51]。

旋转轮原型的工程设计与磁轴承 已完成基于 ANSYS 的旋转轮设计，包括磁轴承、真空容器和 OMD（见图25）。

磁轴承的技术规范已制定完成，STEP文件也已分享给工业制造商。在首个ITN阶段，已与制造商交换了一份关于磁轴承主轴的意向书，其中包括控制系统，并要求满足国际直线对撞机的全部要求（目标重量、转速和公差）。

为验证完整旋转轮系统的原型，将使用市售产品。例如，可以从商业供应商处购买缩小版的国际直线对撞机旋转轮，用于测试加热靶的辐射冷却。

总结与展望 波荡器规格和靶材料测试已完成。根据XFEL实际长期运行经验，波荡器切实可行，能够稳定运行，不会出现运行问题。通过扫描方法和同步辐射衍射进行的精确靶分析表明，即使PEDD达到预期年值的数倍，材料也几乎没有损伤。因此，亮度升级方案同样可行。完整旋转轮系统的基于CAD的工程设计已经完成，并已就磁轴承事宜与制造商建立联系。计划在2026年上半年确定适合开展原型测试的场所，并在2026年下半年制造缩小版原型。作为光学匹配装置（OMD）的脉冲螺线管，其机械设计和基于CAD的工程设计均已完成。已订购缩小版原型的首次测量，目前正在等待交付。预计在2026年上半年制造更多原型，并根据当前测量结果完成设计。迄今为止，尚未发现基于波荡器的国际直线对撞机正电子源存在任何重大障碍。

2.2.3 电子驱动正电子源（WPP-8-11）

2.2.3.1 描述

概述 电子驱动正电子源广泛应用于过去和现今的加速器设施中。其运行原理采用简单且成熟的技术——

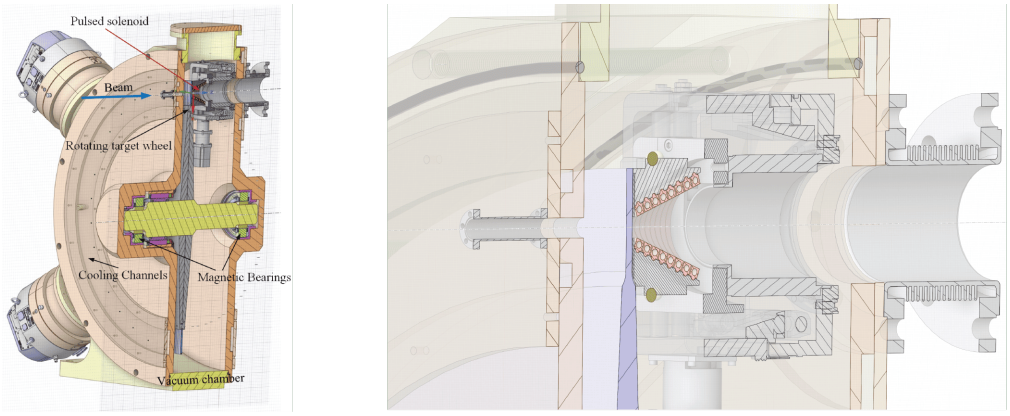


图25：基于 ANSYS 仿真的旋转轮设计，包括磁轴承、脉冲螺线管和真空容器（左图）；脉冲螺线管装置的细节照片（右图）。

然而，为满足国际直线对撞机的宏大要求，必须提供 $131.2 \times 10^{12}\, e^+/\mathrm{s}$。

表6总结了国际直线对撞机和 SuperKEKB 采用的电子驱动正电子源的基本参数。虽然各项目的束团结构不同，因此比较数值时应谨慎，但以 SuperKEKB 的正电子源为例——它是目前运行中强度最高的正电子源——便可了解相关要求有多么严苛。

表6：SuperKEKB 与国际直线对撞机正电子源参数对比

项目	SuperKEKB	ILC
e^- 靶上束流		
能量（GeV）	3.5	3
每个脉冲的束团数	2	66
重复频率（Hz）	50	100（300）
束流功率（千瓦）	3.5	74
e^+ 阻尼环后的束流		
$N_{e^+}/\ N_{e^-}$	0.4	>1
束团电荷（nC）	4	3.2
正电子数（$10^{12}e^+$/s）	2.5	131.2

本工作包的目标是通过设计和原型制造，证明国际直线对撞机电子驱动正电子源工程设计的可行性。

图26展示了目前正在开发的电子驱动正电子源的横截面图。该正电子源由靶、磁通集中器（FC）、螺线管以及用于捕获和加速所产生正电子的加速结构组成。从图中可以看出，许多设备被布置在狭小的空间内，即使是细微的布局变更，也会对性能产生重大影响。因此，除了开发各个组件外，总体设计对于确保整个系统的可行性也至关重要。模拟和性能评估应基于可行的布局进行，以便得出有意义的设计。

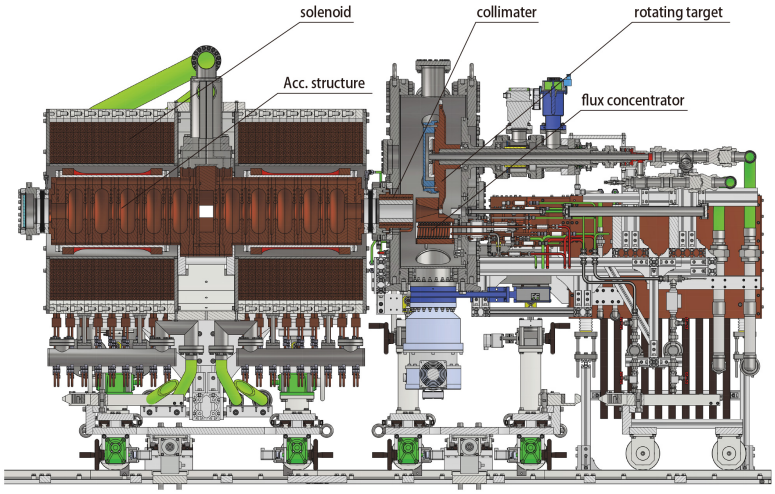


图26：KEK iCASA 正在开发的电子驱动正电子源原型的横截面视图。

考虑到这些事实，我们开发电子驱动正电子源的策略如下。

- 在详细设计各部件之前，先完成总体设计
- 采用相对保守的布局，在首个原型中优先考虑可制造性，而非性能。
- 基于首个原型设计开展仿真，探索改进方向，并制定策略，将这些发现应用于后续原型。
- 尽可能借鉴 SuperKEKB 的经验和设计

各部件的开发目标如下。

旋转靶 预计入射到靶上的电子束能量为 3 GeV，功率为 74 千瓦。估计沉积热最高可达 17 千瓦。为满足要求，需要采用一种兼容超高真空（10^{-6}帕）和高辐射环境的水冷旋转靶。

磁聚焦 磁通集中器（FC）是一种通过脉冲电流流经具有锥形内表面的导体，产生逐渐减弱磁场的装置，已广泛应用于以往的正电子源中。靶产生的正电子束具有较大的角度展宽。为了使其符合下游加速管的接收度，需要将位置展宽转换为角度展宽。FC 是一种实现这种转换的匹配装置。由于能量接收度取决于磁场，设计目标是通过使用更强的磁场，在更宽的能量范围内捕获正电子。表7列出了 SuperKEKB 和国际直线对撞机的 FC 参数。

国际直线对撞机对正电子捕获效率的要求是 SuperKEKB 的 2.5 倍，因此需要更强的磁场和更大的孔径。此外，受束团结构和运行要求影响，重复频率为 100 脉冲每秒，是 SuperKEKB 的两倍。综合这些因素，预计欧姆损耗产生的热负荷将比 SuperKEKB 高一个数量级以上。

表7：SuperKEKB 与国际直线对撞机磁通集中器参数比较

	unit	SuperKEKB	国际直线对撞机
峰值电压	kV	20	20
峰值电流	kA	12	35
重复频率	pps	50	100
脉冲宽度	μs	6	11
入口孔径	mm	7	12
峰值磁场	T	3.5	5
峰值功率	MW	240	700
平均功率	kW	12	128
FC欧姆损耗	kW	0.8	8.9

俘获腔 为了尽可能高效地俘获并加速靶产生的正电子，需要将腔体安装在尽可能靠近靶的位置。另一方面，靶产生的簇射所造成的热负荷会随着腔体向靶靠近而增加，而且热效应会因束流开启或关闭而有很大差异。在本设计中，假设靶后紧邻的腔体因簇射而承受约 20 千瓦的输入热量，并对冷却结构进行设计，使其在这些条件下仍能将谐振频率偏差控制在允许范围内。为快速聚束能散较大的正电子束，需要较高的加速梯度。为提高捕获效率，需要较大的孔径。为补偿多束团束流造成的束流负载，需要一定的群速度。此外，由于腔体安装在螺线管中，还必须满足外形和支撑方面的限制。

靶更换 束流运行后，靶将具有放射性。考虑到束流照射到靶上的功率约为 SuperKEKB 的 20 倍，预计放射性强度也将大致按相同比例增加，因此难以长时间在该区域周边作业。此外，正电子源将安装在地下深处，预计从地面进入将受到严格限制。在这种条件下，需要一种能够处理故障并定期更换的机制。在本原型开发中，将设计并评估几种关键机制。

2.2.3.2 现状

概述 当前原型设计和制造分别于2022年和2023年开始。除图26中的加速结构外，所有部件均已交付并完成组装。螺线管电源和控制系统、监测系统的电源也已安装并调试完成，但磁通集中的脉冲电源除外。目前，我们正专注于开发缺失的两个部件（加速结构和磁通集中器的脉冲电源），同时对已交付的部件进行评估。图27展示了2025年7月原型和测试台的照片。

旋转靶图28和图29分别展示了组装在真空室中的旋转靶的三维模型横截面视图和照片。



图27：2025年7月实验区域概览。

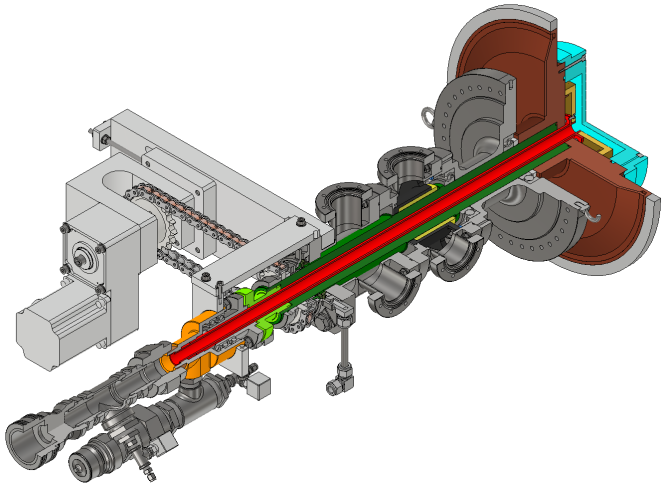


图28：旋转靶的横截面视图。

旋转机构采用了间隙极小的两级差分抽气系统和碳化硅机械端面密封 [41, 42]。采用链传动系统，以便于调节电机位置。电机为无刷直流电机（400 W，3500 rpm），并集成减速比为1:15的变速箱。它在圆盘轴处实现233 rpm的转速，略高于225 rpm的设计转速。

靶盘由一个钨环和一个铜合金圆盘组成。钨环的外径为500毫米、内径为460毫米、厚度为15.7毫米；铜合金圆盘带有水冷通道，用于固定并冷却钨环。钨环与铜合金圆盘通过液氮冷压接合。接合面的热接触是一个问题。目前正在通过模拟和实验评估接触面的热阻。

旋转机构和靶盘分别于2023年和2024年制造完成。2025年正在从真空、热学和机械角度进行评估。

极限压力由冷阴极离子规测量，残余气体成分由残余气体分析仪（RGA）进行分析。抽气约一周后，压力达到 1×10^{-5}帕或更低。残余气体的主要成分

是水。大气成分氮气所占比例不到十分之一。旋转与非旋转条件下未观察到差异。考虑到为降低成本并便于测试，部分位置使用了橡胶 O 形圈，以及腔室未进行烘烤处理，这些是限制最终压力和残余气体成分的主要因素。即使在当前压力下，实际运行也不存在问题。此外，根据大气压可以认为，其密封性能是足够的。

通道中的水流速度是决定从靶到冷却水传热效率的重要参数，已通过模拟和实验进行了评估。图30给出了计算流体力学模拟结果。该模拟由杰斐逊实验室在高能物理领域的美日科技合作计划合作下完成。图31展示了粒子图像测速（PIV）实验装置以及可视化的流速。测试使用了由聚碳酸酯制成的全尺寸透明靶模型。

为模拟束流产生的热负荷，将铜块夹具安装在钨盘上，并将筒式加热器插入其中以进行热测试。温度分布由红外相机测量。对接触面积的热流密度和热阻进行了评估。在加热器功率为20千瓦时，根据冷却水流量和旋转靶的温升估算，约有13.5千瓦传递到靶盘。接触面积的热阻与计算数值在一个数量级内一致。根据迄今进行的测试，我们认为接合部不存在实际问题，但束流预期热负荷约为17千瓦，我们计划今后以超过该数值的热输入进行测试。

使用电机驱动器的输出功率监测器进行了扭矩测量。无论转速如何，扭矩几乎恒定在约9 N·m。所用电机的连续额定值约为12 N·m，并确认连续运行不存在问题。扭矩不随转速变化而保持恒定这一结果表明，摩擦不存在转速依赖性。

靶盘与磁通集中器之间的间隙目前设计为 2 mm。如果这一距离发生变化，将对正电子捕获效率产生重大影响。最坏情况下，靶盘与磁通集中器可能发生碰撞。由于磁通集中器是脉冲磁体，预计磁通集中器的磁场与靶盘上流动的涡流所产生的电磁斥力会对轴施加力矩载荷。因此，旋转精度和

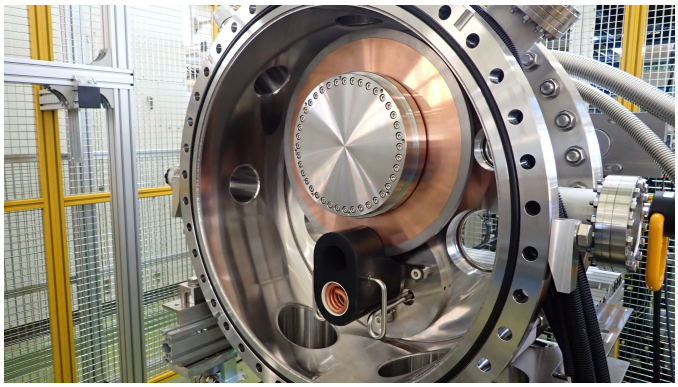


图29：与磁通集中器一同组装在真空室中的旋转靶。

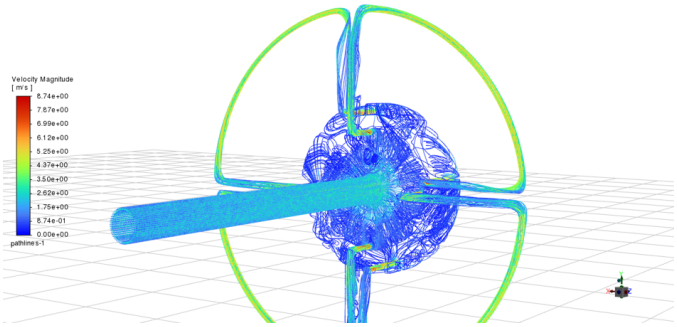


图30：通道内水流的计算流体力学结果。

轴的刚度是稳定运行的重要因素。为此，使用激光位移传感器（基恩士，LK-G500）测量了圆盘跳动。传感器安装在圆盘两侧，并根据测量结果之和与差，分离出由圆盘自身厚度变化和轴摆动造成的部件，对结果进行了评估。结果显示，厚度变化为 $\pm 30 \mu$m，摆动为± 70 μm。改变转速时，振幅没有变化。可以忽略旋转引起的共振影响。最大振幅约为 $\pm 100\,\mu$m，相当于设计间距 2 mm 的约 5%。这不会对正电子捕获效率或其他因素产生显著影响。

迄今为止，最长的连续运行测试持续了约一个月。我们准备了传感器和软件，以便长期连续收集各种数据，并使用 Archiver Appliance 搭建了归档系统。另一次长期连续运行测试计划于2025年9月进行。

磁聚焦 为满足要求，我们重新评估了材料，改进了水冷结构，并使用 CST Studio[43] 对电磁场和热分析进行耦合分析，据此设计了一种新型磁通集中器。图32展示了该磁通集中器的横截面视图和下游视图，以及组装完成后的照片。

FC 的脉冲电源将大于 SuperKEKB 的脉冲电源，这是由于

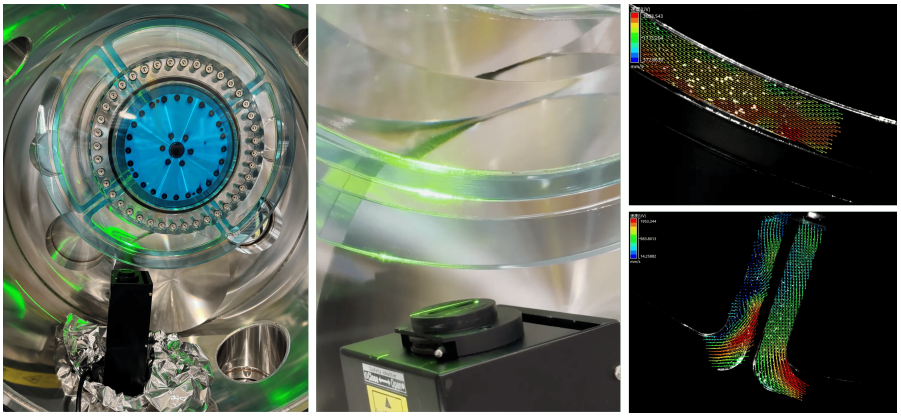


图31：PIV实验装置（左图和中图）及可视化流速图（右图）。

性能要求不断提高所致。特别是，鉴于束团结构的要求，尽管脉冲重复频率为每秒 100 个脉冲，但脉冲间隔为 3.3 毫秒，因此需要缩短充电时间。为降低充电负荷和热负荷，目前正在开发一种具有能量回收功能的电源，该功能可将储存在线圈中的能量回收到电容器中，而不是将其耗散到电阻器上。

脉冲电流通过同轴电缆和母线供给磁通集中器（FC），与 SuperKEKB 的方式类似。为防止电缆因辐射而劣化，电缆必须在距靶一定距离处连接到母线上。在 SuperKEKB 中，母线采用风冷；但此处每秒脉冲数翻倍，峰值电流约为其三倍，因此在有限空间内的母线采用水冷。电缆选型已完成，目前正在办理采购。

母线和电缆连接箱已完成设计、制造和安装。图 33、34、35 展示了它们的布局和详细信息。

俘获腔 已设计出一种大孔径 L 波段 APS 腔体，其虹膜区采用水冷结构 [44, 45]。图 36 展示了三维模型的横截面视图。

2024年制造了一个常规单元原型。测量了谐振频率，并与模拟结果进行比较，以利用该原型评估加工精度。图 37 展示了原型单元（左）和射频测量（右）。

材料采购和切割于2024年完成。2025年正在进行粗加工、水道加工和热压工艺。预计于2026年进行精加工和整体钎焊。同时，射频测量环境和钎焊夹具的准备工作正在进行。

靶更换 每个部件都被单独制成一个单位，并安装在可沿导轨移动的支撑架上。导轨沿束流线方向铺设。各单位沿导轨移动，到达指定位置后固定。固定各单位的一种方法是在单位上安装图38（左下）所示的模块。安装在单位一侧的模块上的杯形件可以移动。这些杯形件会伸展并压紧图38（右下）所示的、固定在地面上的模块的圆柱段。沿导轨移动时，杯形件固定在居中位置，以避免与其他固定在地面上的模块发生碰撞。

要将各单位运送到指定位置，需要某种移动机构。然而，在每个单位上安装此类机构，会使驱动部件在辐射环境中的维护变得困难。为避免这一问题，可使用电动台车拖曳各单位进行运输。这些台车存放在操作期间人员能够进入的区域。为实现这一方案，必须开发一种机构，用于将拖曳台车与各单位连接和断开。图39展示了这种耦合机构，其设计灵感来自自动

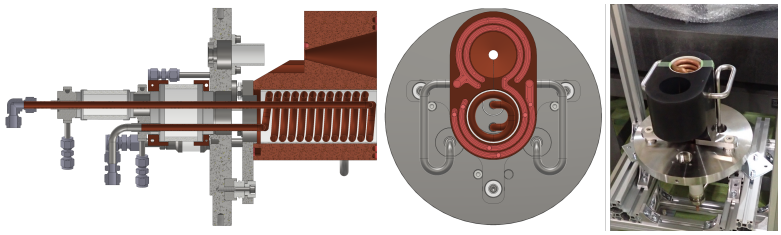


图32：FC的横截面视图、下游视图及照片。

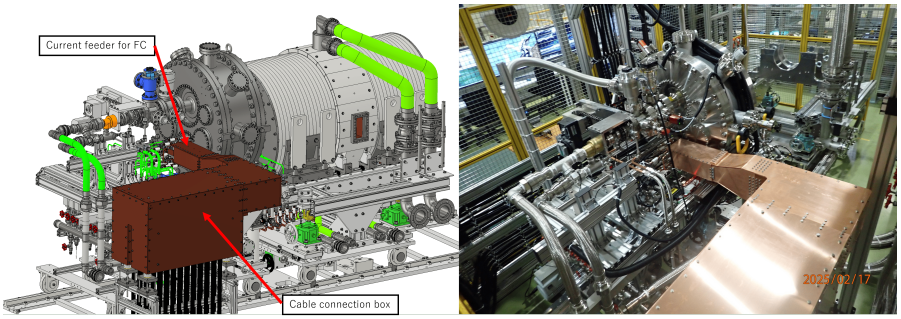


图 33：FC 的电缆连接箱和电流馈线。

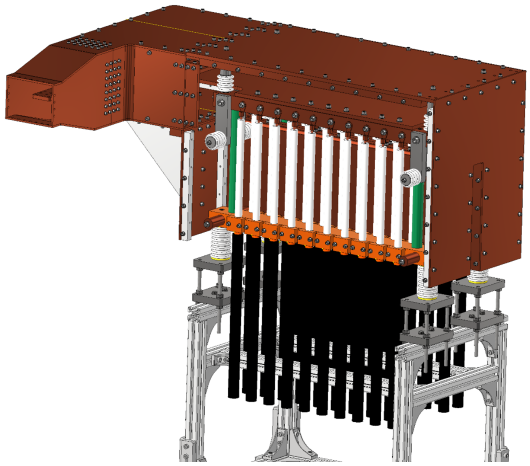


图 34：电缆连接箱。

列车上使用的联轴器。每个单位都可以与电动台车远程连接和断开。

为束流线真空连接开发了一种枕形密封法兰，该法兰广泛应用于 J-PARC 和其他设施。受空间限制，枕形密封法兰与束流准直器组合使用。第一根加速管与靶室通过该法兰连接。

配合枕形密封法兰的法兰通常采用复合电解抛光不锈钢表面，以获得更好的密封性能。然而，这次配合部件本身就是由 Cu 制成的加速器腔体。受连接技术限制，表面材料采用了铜合金（NC50）。图 40 展示了枕形密封法兰和假盲法兰的照片；该假盲法兰的尺寸与安装在此位置的加速腔相同，且由相同材料制成。铜合金一侧的接触表面采用硬铬镀层，以防止氧化并提高表面硬度。真空测试确认，漏率不超过 $10^{-11}\mathrm{Pa}\cdot\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$，极限压力与使用标准盲法兰时相当（不超过 $1\times10^{-5}\mathrm{Pa}$）。

冷却水、压缩空气、真空、波导、螺线管电缆及其他电气布线均需要远程连接机构。各种设施中使用了许多实用的连接件和机构。由于具体要求会因实际安装环境而异，现阶段暂不深入探讨细节。

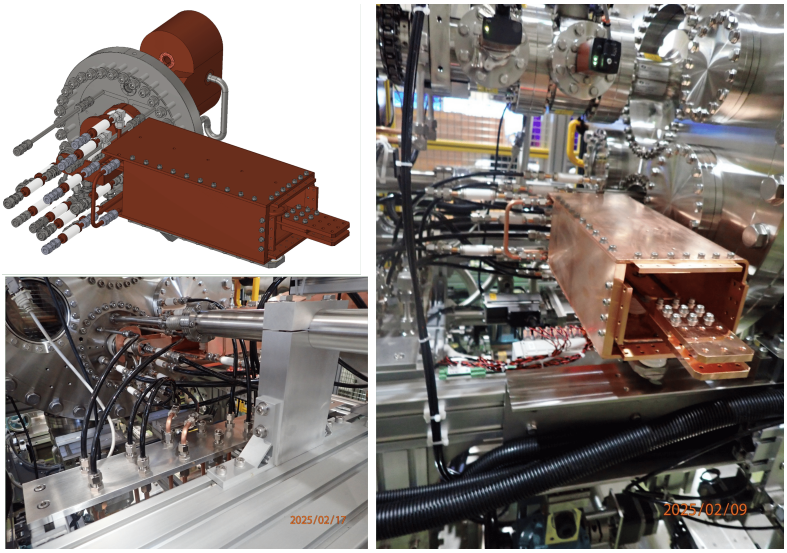


图 35：FC 的电流馈线。

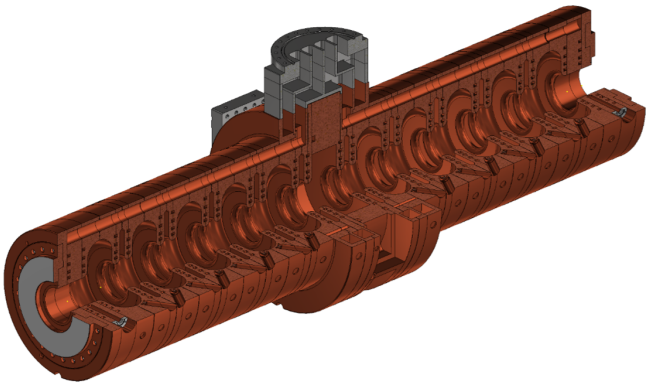


图 36：带水冷结构的 L 波段 APS 腔体大孔径虹膜区横截面视图

其他 图 41（左）展示了螺线管。如图26所示，加速腔两侧均安装有螺线管，并将其固定在同一个支撑框架上，组成一个单位。整个捕获段由40个这样的单位（约60米）串联组成。螺线管的基本结构沿用SuperKEKB的设计，但为适配加速器腔体尺寸，其内径扩大了一倍，外径增加至原来的1.5倍。由于空间限制并为便于组装，冷却水管路的布局已作改进。设计参数汇总于表 8

图 41（右）展示了螺线管的直流电源。为降低成本，采用模块化电源（TDK Lamda，HWS3000-24）。这些模块将采用 3 串联、10 并联的配置连接。目前仅交付了 9 个模块，按 3 串联、3 并联的配置运行。其余模块将于 2025年8 月前交付，预计于 9 月进行满功率测试。两根螺线管各自连接到一个独立的电源单元，从而可以分别进行控制。

联锁与控制系统采用了 NI 的 CompactRIO。软件主要使用 LabVIEW 和 EPICS 开发。采用了 Archiver Appliance

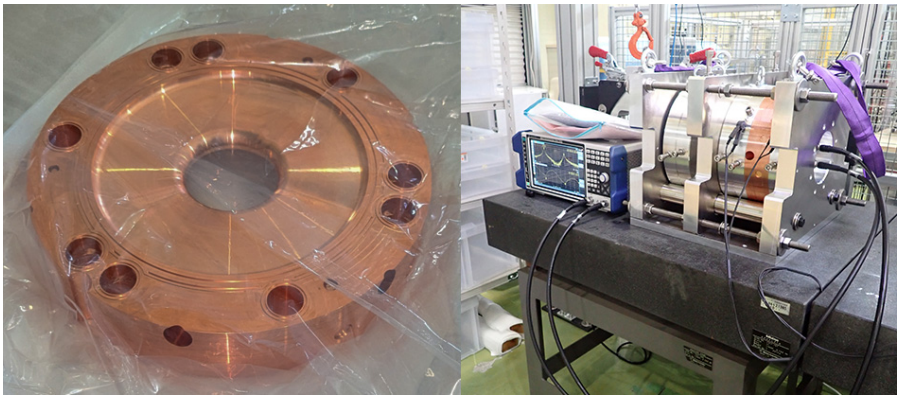


图 37：原型单元（左）和射频测量装置（右）。

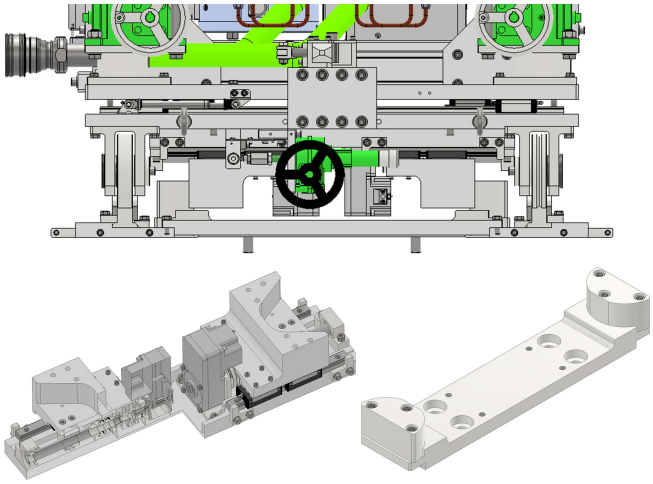


图 38：单元锁定机构。安装在大梁上的可移动模块（左）和放置在地面上的固定模块（右）。图中可移动模块倒置展示，以呈现其机构。

进行数据归档，目前已归档 2,500 多个过程变量。

2.2.3.3 时间表

除加速结构和磁通集中器（FC）的脉冲电源外，原型的所有部件均已交付并安装。缺少的这两个部件正在研发中，预计于JFY2026年底完成。部件评估工作正在进行中，尤其是旋转靶的评估。目前计划于JFY2027完成磁通集中器的组装和满功率测试。

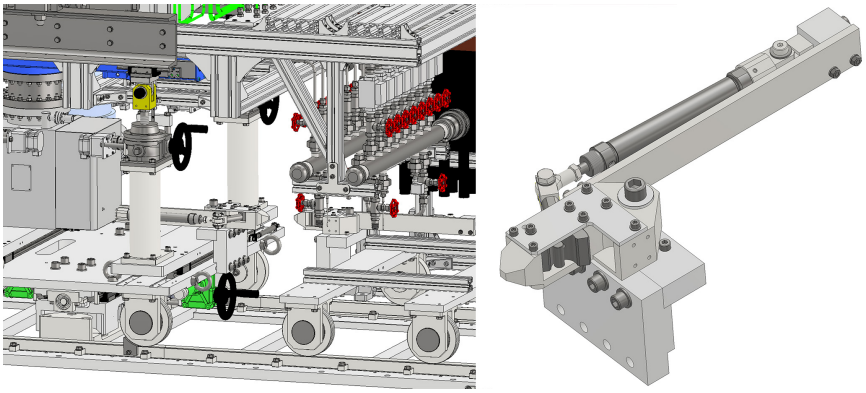


图39：单元连接机构。

2.3 纳米束区域

2.3.1 阻尼环设计（WPP-12）

2.3.1.1 描述

采用常导磁铁的国际直线对撞机阻尼环基线设计是工作包 WPP-12 [2, 3] 的内容。尽管已考虑采用永磁体为国际直线对撞机节能，但在实施国际直线对撞机阻尼环工程设计时，建立基于基本常导磁铁的设计是最关键的因素。国际直线对撞机技术设计报告[1] 中的阻尼环现有设计，是一种采用硬边磁铁模型、磁铁之间间距为零的简化设计。国际直线对撞机阻尼环的设计目标是实现非常大的动态孔径，以最大限度提高正电子捕获产额。国际直线对撞机阻尼环的规格列于表9。然而，有人指出，考虑磁铁的边缘场后，圆形加速器的动态孔径会减小。由于正电子的空间分布因正电子捕获方法而异，动态孔径是影响各种方法正电子捕获产额的一个因素。在选择正电子捕获方法之前，对其进行定量评估至关重要。由于建立阻尼环基本设计也会对国际直线对撞机的其他区域系统产生重大影响，目标是在2027年底前确立该设计。

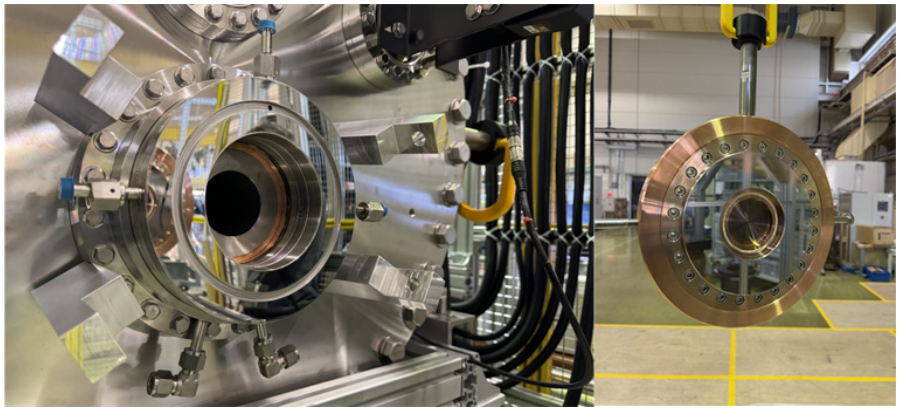


图40：枕形密封法兰（左）和由 NC50 制成的假盲法兰（右）。

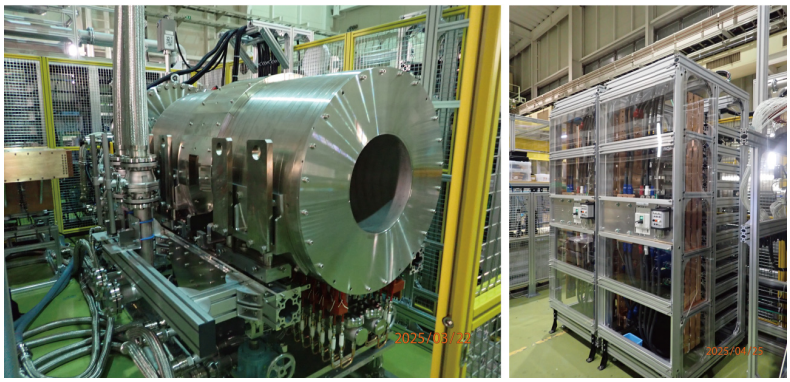


图 41：螺线管（左）和螺线管电源（右）。

表 8：螺线管设计规格

	unit	数值
空心导体尺寸	mm	□14/ϕ8
匝数		432 (36×12)
外径	mm	900
内径	mm	400
长度	mm	579
电流	A	800
电压	V	86
功率	kW	68.8
磁场	T	0.55
冷却水流量	L/min	74
压降	MPa	0.2
冷却水温升	K	14

2.3.1.2 现状

目前的工作重点是将国际直线对撞机技术设计报告中的概念性光学设计转化为实用设计。我们修改了技术设计报告光学设计文件，以适应可行的磁铁尺寸。修改光学设计后发现，将弧段单元中单台3米长的弯转磁铁替换为两台2.4米长的磁铁，可使阻尼环水平发射度（包括束内散射的影响）从6.3μm降至4.1 μm。此外，已确认这些光学设计修改不会改变动态孔径，从而为国际直线对撞机阻尼环束流光学确立了一个切实可行的基准设计。图 42展示了技术设计报告设计与改进设计的弧段单元束流光学，表 10列出了评估得到的发射度和阻尼环参数。

然而，目前评估动态孔径时使用的弯转磁铁模型采用硬边缘磁铁，不包含边缘场。因此，我们计划与KEK、澳大利亚核科学与技术组织和高丽大学合作，开始使用包含边缘场效应的磁铁模型评估动态孔径。此次国际合作研究的启动会议于2025年10月举行。

WPP-12 的目标是完成阻尼环设计，以满足国际直线对撞机要求；

表9：国际直线对撞机阻尼环规格。

		规格
归一化发射度	$\gamma\varepsilon_x/\gamma\varepsilon_y$ 在 N $= 2\times10^{10}$	4.0 μ米 / 20 纳米
动态孔径（作用量变量）	$\gamma\ (A_x + A_y)$	0.07 米
纵向接受度	$\Delta\delta\times\Delta$z	$\pm$0.75 %$\times\pm$ 33毫米

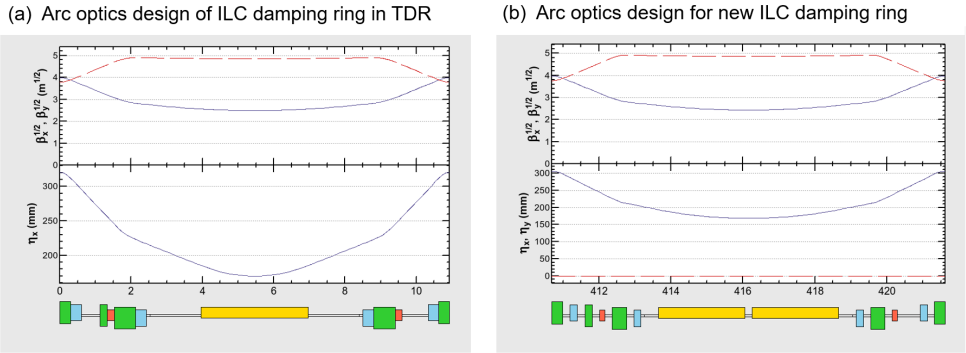


图 42：技术设计报告中国际直线对撞机阻尼环的弧形区段光学（a）及改进光学（b）[53]。

水平和垂直方向的发射度分别达到 4 μm/20 nm（包括束内散射），同时实现 0.07 mrad 的宽动态孔径。国际直线对撞机阻尼环的设计和现实模型的评估将在2027年年底前完成。

2.3.2 阻尼环注入与引出系统（WPP-14）

2.3.2.1 描述

WPP-14 与阻尼环的快速注入与引出系统相关。约十年前，在 KEK 的 ATF，采用纳秒级脉冲长度的半导体脉冲电源的快速冲击器系统实现了束流引出，原则上验证了其可行性。由于半导体技术不断发展，我们将采用最新的半导体技术开发快速冲击器电源。

国际直线对撞机阻尼环的注入/引出带状线冲击磁铁，与英国 Diamond-II 升级项目的储存环注入带状线有许多相似之处——见表 11。Diamond-II 的带状线原型正在开发中，计划在现有的 Diamond传输线和储存环中进行安装和测试。英国公司 Kentech Ltd. 已开始为 Diamond-II 商业化开发碳化硅脉冲发生器。适用的脉冲发生器也在并行开发中，以供

表 10：国际直线对撞机阻尼环在 TDR光学和改进光学下的发射度。通过假设束团粒子数为 N=2×10^{10}[53]，计算了考虑束内散射时的发射度。

		TDR	改进光学
不考虑 IBS 的发射度	$\gamma\varepsilon_x/\gamma\varepsilon_y$	5.74 μ米/20 纳米	3.27 μ米/20 纳米
含 IBS 的发射度	$\gamma\varepsilon_x/\gamma\varepsilon_y$	6.27 μ米/20 纳米	4.08 μ米/20 纳米
阻尼环	$\nu_x/\nu_y/\nu_z$	23.9 毫秒/23.9 毫秒/11.9 毫秒	25.5 毫秒/25.5 毫秒/12.8 毫秒

国际直线对撞机方面已与同一家公司讨论了相关开发。鉴于 Diamond-II 与国际直线对撞机规格之间的协同效应，可以快速且以相对较低的成本开发国际直线对撞机原型脉冲发生器。这也有望实现国际直线对撞机原型脉冲发生器与 Diamond-II 带状线冲击器原型在现场直接进行测试。

	ILC		DIAMOND-II	
运行模式	基线	高亮度	孔径共享	冲击抵消
脉冲结构	1312 脉冲串	2625 脉冲串	注入 单次脉冲	注入 双次脉冲
重复频率	5 Hz	5 Hz	5 Hz	5 Hz
脉冲持续时间（全宽）	< 6 纳秒	< 3 纳秒	< 3 纳秒	< 15 ns
脉冲间隔	554 ns	332 ns	-	$\sim$ 2-20 μs
电压	± 10 kV	± 10 kV	± 20 kV	± 20 kV
技术	漂移阶跃恢复二极管? 氮化镓?	漂移阶跃恢复二极管? 氮化镓?	雪崩	SiC

表 11：国际直线对撞机与 DIAMOND-II 带状线冲击磁铁的比较

2.3.2.2 现状

JAI/牛津与欧洲核子研究中心近期签署了一项协议，决定在牛津开展脉冲发生器原型开发工作。在此之前，该公司已针对合适脉冲发生器的初步设计进行了初步仿真。现在可以开始设计、制造和后续测试新型阻尼环冲击器脉冲发生器模块。该模块应满足国际直线对撞机开发团队（IDT）规定并商定的概要要求。牛津大学将参与设计、建造、测试以及结果和仿真的分析，工作计划如下：

- 与 IDT 专家协商，制定性能目标规格。
- 开展采购流程，与确定的供应商签订合同，并通过定期会议跟进供应商的技术进展。
- 测试原型脉冲发生器，并报告其性能。

目标是在2026年10月左右完成原型，并于2027年9月前完成测试和表征。

2.3.3 最终聚焦（WPP-15）

2.3.3.1 描述

WPP-15涵盖国际直线对撞机束流传输系统的系统设计，以及推进其所需的束流技术[2]。尽管原始WP-15中列出的一些项目可以在ILC预实验室启动后开展，但应将时间紧迫的工作范围缩小至优先级较高的研究课题。因此，以下3个研究课题被选为WPP-15 [3]的时间紧迫项目。

- 尾场抑制
- 高阶像差的抑制与校正
- ILC束流调谐（机器学习等）培训

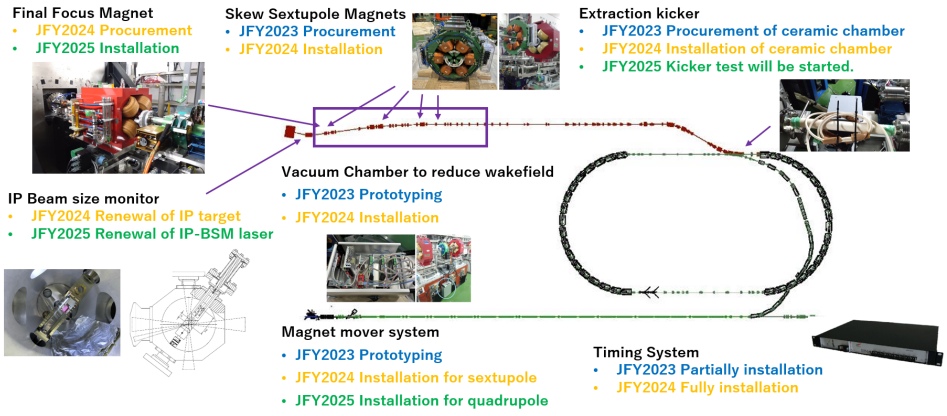
ATF2 束流线是世界上唯一用于测试直线对撞机最终聚焦束线的现有测试加速器，而在 ATF 开展最终聚焦束线研究对国际直线对撞机至关重要。针对国际直线对撞机最终聚焦系统的技术研究已在 ATF2 束流线上通过 ATF

国际合作组开展国际合作。ATF国际合作组研究的首要目标，是将束流聚焦至国际直线对撞机所要求的水平，并稳定束流位置。ATF2 束流线已实现 41 纳米的束流尺寸，是世界上最小的数值，与 37 纳米的目标相当[54, 55]。在束流位置稳定方面，利用列内反馈技术，束流位置已稳定在束流位置监测器的分辨率范围内[56, 57]。ATF加速器建于地面，因此比国际直线对撞机更容易受到环境噪声影响。因此，要在 ATF 保持束流状态稳定，远比预期的国际直线对撞机运行更具挑战性。

因此，根据 ITN 开展的研究主题，ATF 研究目前聚焦于将束流聚焦至 ATF 焦点处的 37 nm，并使束流尺寸保持稳定数天。最新的束流调谐技术是 WPP-15 的研究主题之一，对实现 ATF 的主要目标至关重要。为实现 ATF 的主要目标，已在 ATF2 束流线上开发束流诊断设备，用于开展各种束流测试。此外，要实现 ATF 的主要目标，还需要通过尾场抑制和沿 ATF2 束流线进行多极误差抑制来提升电子束流品质。拟开展的 WPP-15 研究主题包括：尾场抑制、多极误差抑制，以及通过 ATF 国际合作组实现 ATF 超小束流的稳定运行，从而开展 ILC 束流调谐培训。

2.3.3.2 现状

WPP-15 的国际发展研究在 ATF 国际合作组框架下启动。项目上半阶段侧重于硬件升级，旨在更换老化部件并提升 ATF 加速器的性能。项目下半阶段将利用升级后的设施开展全面的束流测试。2025财年正处于上半阶段计划的最后阶段，硬件升级正按计划推进。硬件升级的当前情况见图43。束流研究也在通过 ATF 国际合作组持续推进，2023财年以来参与 KEK 以外 ATF 研究的研究人员统计数据见表12和图44。各方面的详细进展如下。



Fi图 43：为 ITN 纳米束研究进行的 ATF 硬件升级现状 .

尾场抑制由于电子束在 ATF2 束流线的焦点处被聚焦至纳米级，尾场引起的束流偏转会显著影响相互作用点束流尺寸。在 ATF2 束流线上，

表12：2023年和2024年到 ATF 开展研究的 KEK 以外研究人员按研究机构划分的统计数据。

	2023财年	2024财年
运行周	14	20
国家	7	5
机构	10	7
人日	387	358

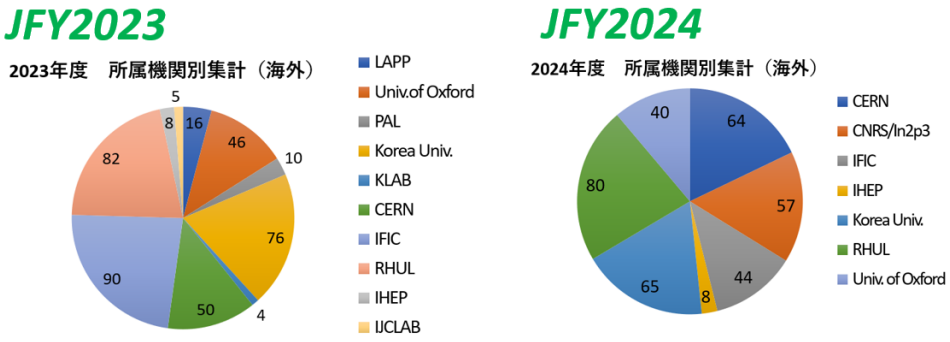


图44：2023年和2024年赴 ATF 开展研究的 KEK 外部研究人员所属研究机构分布。

即使是超小束流，诸如 ICF 法兰间隙这样的微小阶差也会产生影响，尽管这是一条束流传输线。ATF国际合作组正在研究多种尾场模型，这些模型考虑了整条束流线真空室中的阶差[58, 59]。通过将这一更贴近实际的尾场模型与实际测量结果进行比较，人们对尾场对纳米级超小束流的影响有了更深入的认识。在2023年运行期间，KEK在 ATF2 束流线上安装了一台装置，能够同时移动多个仿照 ICF 法兰形状的结构。这使我们得以研究 ICF 法兰对尾场效应的影响，并确认 ICF 法兰确实会影响束流（图45）。

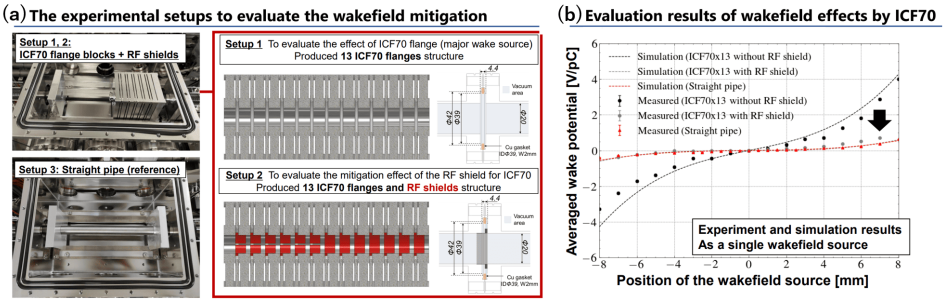
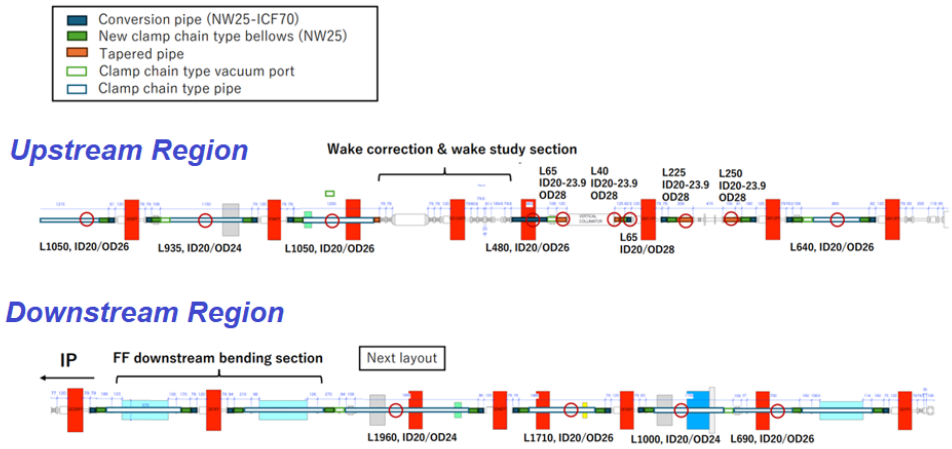


图45：在 ATF2 束流线评估了 ICF70法兰的尾场效应。(a) ICF70法兰尾场测量装置。(b) 安装和未安装射频掩模时 ICF70法兰的尾场测量结果。[60]

为此，2024年重新建造了真空室，以尽量减小台阶差异

尤其是 ATF2 束流线中尾场敏感区域的真空室内表面（图 46）。



F图46：ATF2 束流线真空室升级示意图。

高阶像差的抑制与校正 由于电子束在 ATF2交互点被聚焦至纳米尺度，因此控制磁体对束流产生的细微多极场误差至关重要。为减小多极场误差对纳米尺度束流的影响，使用多极场误差较小的磁体至关重要。ATF2 束流线的末级聚焦双磁铁是在 ATF2建设阶段，在参与 ATF国际合作组的实验室协助下，对此前用于另一台加速器的磁体进行改造并重复使用的。该磁体最初并非按照 ATF2 最优聚焦磁体的要求设计和制造。因此，其中一个末级双磁铁于2022年新制，并于2023年安装。2024年，剩余的末级聚焦磁体完成制造，并于2025年装入束流线。原有和更新后的 ATF2 最终聚焦磁体的多极场测量结果见图 47。更换磁体后，ATF2 最终聚焦磁体的多极场得到改善。此外，ATF2 束流线使用的磁铁移动系统也已明显老化，尤其是控制电路，一旦发生故障便没有可替换的备件。因此，2023年更新了六极磁铁的移动器，这些磁铁对位置控制精度的要求十分严格。自2024年起，也逐步更新了四极电磁铁的移动器，这些磁铁同样对位置控制精度有很高要求。计划与欧洲核子研究中心及 ATF国际合作组内的其他成员合作开展束流测试，以研究磁体和磁铁移动器改进所产生的影响。

国际直线对撞机束流调谐培训（机器学习等） 通过 ATF国际合作组，在 ATF加速器开展结合机器学习的束流调谐技术研究也在不断推进。自2022年起，ATF一直在优化阻尼环中的束流注入效率、优化ATF2焦点处的相互作用点束流尺寸调谐旋钮，并进行阻尼环中的发射度调谐[61]。尽管这些调谐工作证明了机器学习对于ATF加速器束流调谐的实用性，但其仅限于为现有调节旋钮寻找最优数值。

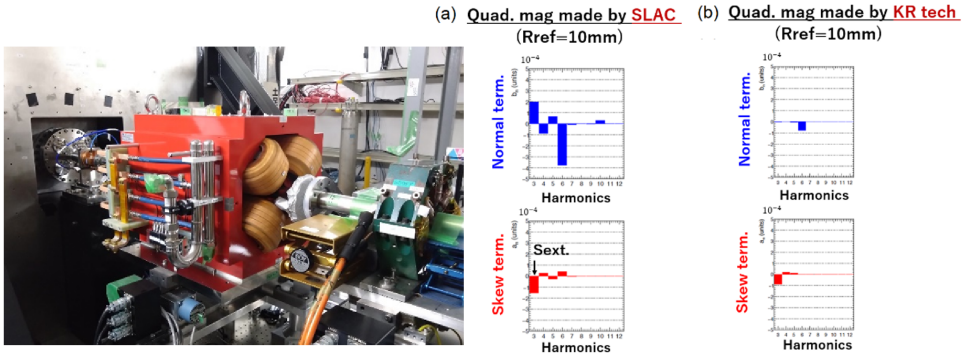


图47：翻新后的ATF末端聚焦磁铁，以及原ATF末端聚焦磁铁（a）和翻新后的ATF2末端聚焦磁铁（b）的磁场测量。

下一步需要引入基于仿真的强化学习[62, 63]。目前，ATF合作组正与KEK、欧洲核子研究中心和IJCLAB开展国际合作，为ATF加速器开发飞行模拟器。其目标是将通过模拟获得的束流调谐方法高效地转移到实际加速器中。预计即使是参与ATF国际合作组、但位于KEK以外国家的研究人员，也能够通过模拟高效开展强化学习。通过这些工作，旨在建立一种在ATF焦点处进行束流尺寸调谐的新型优化流程，并缩短优化时间。此外，还计划与欧洲核子研究中心合作，利用超低β光学，在更具挑战性的束流调谐条件下开展束流调谐，以推进束流调谐技术[64]。

此外，通过反馈推进束流稳定技术对于实现稳定的束流运行至关重要。牛津大学曾推进ATF加速器列车中的反馈技术，但由于COVID-19的影响，进展一度停滞。ITN启动后，这项反馈研究得以恢复，目前正在积极开展。

推进WPP-15所需的技术开发 ATF国际合作组正通过稳定定时系统来推进束流稳定工作，并提升束流诊断系统，以推进WPP-15。为满足ITN启动后研究人员人数增加的需求，ATF正优先升级需要较长故障排除时间的设备。定时系统是最高优先级。因此，自2021年以来，在SuperKEKB组的合作下，我们一直在将定时系统从旧式基于CAMAC的系统迁移至基于事件的定时系统。迄今为止，所有主要子系统和束流诊断设备均已升级至新的定时系统。目前，我们正与IJCLAB合作，积极研究射频电子枪激光脉冲与射频时钟之间同步的稳定性，以及这种稳定性对电子枪正下方和ATF束流传输线沿线电子束参数的影响。这些工具使用了嵌入由IJCLAB开发的低抖动IDOROGEN电路板中的CERN White Rabbit协议[65]。

此外，ATF国际合作组正在积极开发ATF束流调谐所需的束流诊断设备，以及国际直线对撞机加速器所需的束流诊断设备。关于ATF的束流诊断，IP束流尺寸监测器正在升级。IP靶已于2025年更换，IP束流尺寸监测器所用激光计划于2026年更换。这些升-

级预计能够在相互作用点实现稳定而精确的束流尺寸测量。IFIC与高丽大学正在为ILC主直线加速器开发束流位置监测器[66, 67, 68]，欧洲核子研究中心正在开发切伦科夫衍射辐射监测器，将其作为非破坏性束流尺寸监测器[69, 70]，并使用ATF加速器。

WPP-15完成计划 WPP-15的目标是到2028年3月，在ATF相互作用点实现37纳米束流稳定运行数日。目前正在进行的硬件准备工作将把WPP-15的目标日期提前至2026年3月，包括采购多极场误差较小的磁体和IP束流尺寸监测器激光器，以及对真空室进行更新，采用最小台阶结构以降低尾场。与此同时，ATF加速器将通过ATF国际合作组，致力于创建一个加速器运行平台，将采用最新束流调谐技术的仿真与加速器运行相结合，为2026年开始硬件升级后的全面调谐做好准备。2025年11月底举行的ATF项目会议讨论了未来两年ATF国际合作组围绕WPP-15开展的工作。

用于ATF加速器相互作用点束流尺寸测量的关键设备——相互作用点束斑尺寸监测器激光器，计划于2026年1月采购。束流聚焦工作将以在ATF实现37纳米束流聚焦为目标，计划于2027年春季完成，同时利用最新束流调谐技术推进该相互作用点束流尺寸监测器的调试。在ATF项目会议上确认，最新束流调谐技术将继续借助飞行模拟器得到推进。该模拟器通过仿真复现实际的ATF加速器，并将通过仿真开发的调谐程序应用于ATF加速器，这项工作主要由ATF国际合作组中的欧洲核子研究中心牵头。此外，还确认了参与这项工作的各研究机构所作出的贡献。

关于束流稳定，除了使用 FONT 进行列内反馈以稳定第二束流外，ATF项目会议确认，将与相关机构启动探讨，研究基于地面振动和阻尼环轨道信息、使用 FONT 系统对引出束流的位置和角度进行前馈的可行性。此外，会议确认将通过同时从 ATF加速器采集长期束流和硬件信息来推进大数据采集。这些数据将用于机器学习，以研究束流不稳定性的因素及相应的应对措施。通过这些工作，将以到2028年春季能够在 ATF加速器稳定维持聚焦束流数天为目标，推进相关开发。

2.3.4 磁体振动评估（WPP-16）

2.3.4.1 描述

WPP-16 的目的是设计国际直线对撞机（ILC）的末级双磁铁（FD），并评估相关 QD0 低温恒温器的振动[2, 3]。在技术设计报告（TDR）基线方案中，QD0 所需的 1.9 K 超流氦由服务低温恒温器供应，外部磁体电源引线也通过服务低温恒温器连接[1]。服务低温恒温器通过一条较长的氦II低温管线与 QD0 相连；这条管线必须穿过末端 Pacman 辐射屏蔽层中的迷宫结构，以避免束流线辐射沿直线路径照射到推定有人值守的实验探测器大厅。必须将 QD0 的垂直束流波动稳定在约 50 纳米，以确保其处于列车内对撞反馈的捕获范围内。这不仅会对国际直线对撞机加速器的设计产生重大影响，也会影响探测器及其接口的设计，因此我们需要在 ILC 预实验室启动之前，明确末级双磁铁振动的影响。

2.3.4.2 现状

由于布鲁克海文国家实验室一直牵头开展国际直线对撞机末级聚焦（FD）的研究，因此原本预计由布鲁克海文国家实验室作为这项振动实验的主要实验室。此外，这项研究所需的设备已在技术设计报告阶段于布鲁克海文国家实验室准备就绪，继续使用目前存放在该实验室的设备至关重要。然而，布鲁克海文国家实验室参与 ITN 尚未获批。尽管这项计划十分重要，WPP-16 本身却一直没有进展。

另一方面，SuperKEKB所用QD0磁体的振动要求已与国际直线对撞机将采用的最终聚焦磁体相当。SuperKEKB磁体为采用4.2 K氦冷却的超导磁体，不使用超流氦。通过精心设计，SuperKEKB已将这种非超流4.2 K氦冷却超导最终聚焦磁体的低温模块振动降至50 nm[71]。

现阶段，技术设计报告中所述采用超流氦的最终聚焦系统被视为国际直线对撞机的主要候选方案。然而，由于布鲁克海文国家实验室的振动测量可能无法在国际直线对撞机预实验室建立之前完成，因此认为有必要基于SuperKEKB的低温恒温器设计来设计一套新的最终聚焦系统。

2.3.5 束流收集器设计（WPP-17）

2.3.5.1 描述

主束流收集器在每条束流线末端吸收碰撞后的电子束或正电子束。由于 1 TeV 升级后满功率运行时的束流功率额定值为 14 MW，因此设计了一台功率为 17 MW 的加压水束流倾倒器，其中包含 20 % 的安全裕度。该设计以 SLAC国家加速器实验室的 2.2 MW 水束流倾倒器为基础，于 2000 年代在 GDE 框架下开展，相关成果已发表 [72] ，并汇总于技术设计报告中。

这台兆瓦级束流倾倒器的设计概念如下：束流由 1,312 或 2,652 个束团组成，通过扫描注入点注入主束流倾倒器，使注入点形成直径约 12 cm 的圆形区域，以防止倾倒器内局部热量积聚。同样，倾倒器内沿束流轴加热的水也需要尽快排出。可通过在倾倒器容器内形成涡流水流来实现这一点。此外，水应加压至约 1 兆帕，以防止束流注入轴上因热沉积最大而导致沸腾。

束流倾倒器容器采用直径为 1.8 m 的圆形横截面设计，以形成涡流。束流窗偏心安装在倾倒器上，以实现有效的涡流性能。两根带喷射狭缝的供水管分别安装在左右两侧，一根回水管则安装在容器中央。水容器长 11 m，以为束流提供足够的辐射长度。图48展示了技术设计报告中的概念结构。设计中，喷射狭缝处的水流速度为 2.2 m/s，倾倒器的总供水量为 210 l/s。

已使用 FLUKA模拟程序评估束流倾倒器及其周围屏蔽体的活化情况。结果表明，如果国际直线对撞机以最大束流功率运行一年，预计维护工作期间的辐射水平将达到 100 mSv/h。必须限制人员进入收集器室。束流收集系统需要采用坚固的设计。例如，束流窗需要每隔几年或更短时间进行维护。倾倒器容器还包括涡流水流结构，也必须采用坚固结构，以防止机械失效。

以下选定了主束流收集器的工作包项目，以便为工程设计文档准备稳健的设计。

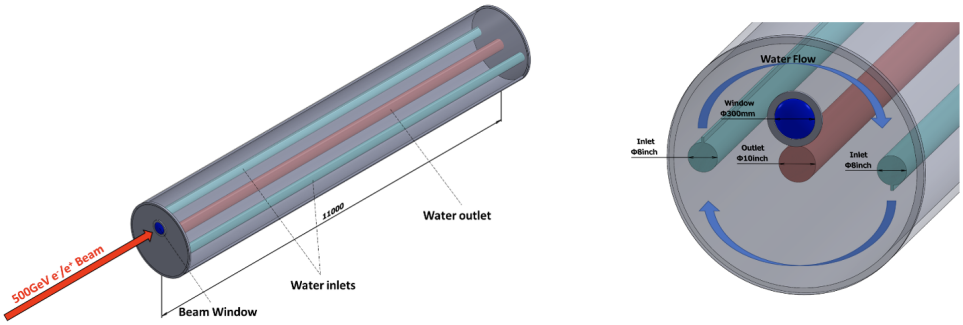


图48：技术设计报告中主束流收集器的概念结构

- 开发倾倒器容器内涡旋水流系统的设计，并通过小规模原型制作进行验证。
- 开展束流窗远程更换系统的设计，并通过部件的小规模原型制作验证其关键功能。
- 设计总体水流系统
- 设计故障对策/安全系统

首先，为倾倒器容器内的涡旋生成结构制定稳健设计。基于仿真推进设计，建造关键区段的小型模型，并验证涡旋生成。然后，将抗震性和泄漏故障对策纳入更新后的设计，以最终确定循环水系统。对于远程操作的束流窗更换机构设计，首先研究窗口安装结构。随后，将对关键机构进行原型验证，以完善设计。最后，设计更换装置的对准机构，从而完成总体系统设计。

这些研发工作将在五年内实施。前三年将侧重于完善基本设计，后两年将转入原型测试并最终确定总体设计。

2.3.5.2 现状

KEK 和欧洲核子研究中心将承担束流倾倒器工作包。KEK 将制定设计方案并开展原型测试。欧洲核子研究中心将参与讨论并提供协助。

为降低束流倾倒器主体发生机械失效的风险，目前正在修订涡旋水流结构设计。原设计采用带有喷水狭缝的管道；然而，水流通过狭缝时需要达到 2.2 m/s 的流速，且单根管道的总出水量超过 100 l/s。这可能会增加失效风险：水流速度升高会导致管道发生机械振动，并使材料变薄，尤其是在狭缝附近。目前的研究重点是考察多种设计，以确保束流吸收区内的水流速度保持为技术设计报告（TDR）设计所规定的 0.6 m/s。

图49展示了一种避免在倾倒器容器内设置管道结构的可行方案。螺旋翅片引导水形成涡流，向下流至容器末端。根据 ANSYS 模拟，这种结构的流量比原始设计高出 1.5

倍。它将有助于减轻整个系统的负载。目前正在进行进一步研究。

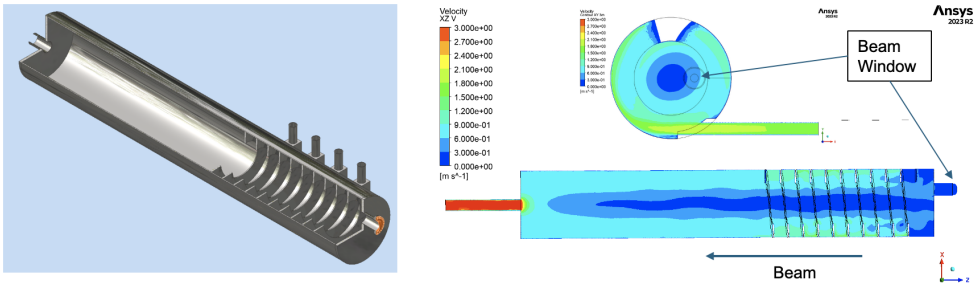


图49：主束流收集器设计更新

目前，在全尺寸倾倒器容器中开展涡流原型测试并不现实，因此我们计划制作一个五分之一比例模型，目前正与工业界合作进行设计。该模型计划于2026年实现。通过比较模拟和模型测得的水流结果，可验证设计，并为确定进一步改进方案提供依据。

束流窗远程更换系统的设计工作也在同步进行。束流窗将采用圆形，宽度大于30厘米，厚度为数毫米。它将由Ti-6Al-4V钛合金制成，这种材料已用于MW质子束靶。通过模拟研究束流窗的损伤情况，评估结果表明，在运行数年后不会出现严重损伤，这是因为电子束在薄窗上的能量沉积相对较低。

维护期间对薄窗进行远程操作被认为颇具挑战。此外，为了密封真空侧和水侧，设想将窗集成到真空管单元中。图50（a）展示了该窗室的一个示例。该单元可通过一端的法兰与倾倒器容器连接。针对这种连接方式，已研究了多种结构，包括夹持式和传统螺栓连接配置。传统的夹持和连接系统似乎可行，目前正在进一步研究其紧固机构。例如，工业界提出了一种采用凸轮式结构将所有螺栓同时紧固的方案，如图50（b）所示。

带有远程操作功能的法兰固定机构设计研究预计需要约一年。我们计划于2026年下半年开始关键部件的原型制作。包括安全措施在内的最终设计将于2027年完成。

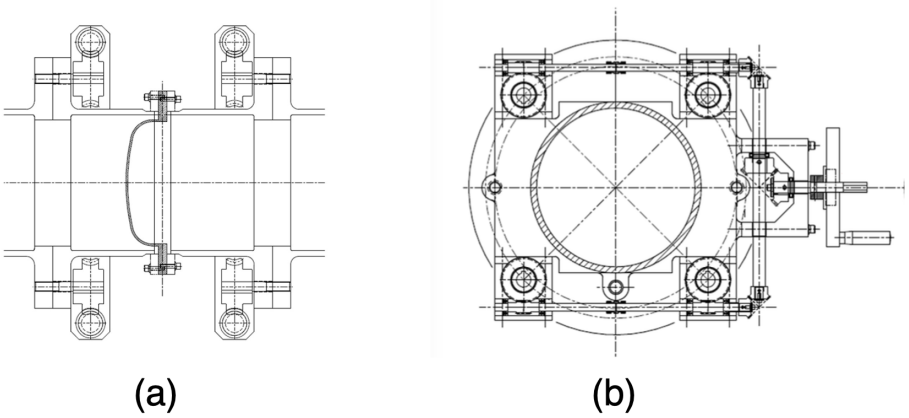


图 50：束流窗腔室的设计

3 结论

除蟹形腔工作包外，所有 ITN 工作包均已指定负责执行的研究所；蟹形腔工作包仍需确定负责的研究所。尽管启动阶段比最初预期耗时长得多，但目前工作正按照商定的计划稳步推进。目前预计，正在进行的工作包将于2027年4月前完成，届时日本文部科学部目前为先进加速器研发提供的资金将到期。

虽然 ITN 的主要目标是为国际直线对撞机开展工程设计研究，但这些工作包与其他粒子物理加速器项目密切相关，包括欧洲核子研究中心的未来环形对撞机，以及同步辐射光源设施。还应指出，尽管面向长期未来直线对撞机的研发活动（例如开发高梯度加速腔和能量回收直线加速器技术）不属于 ITN 当前的工作范围，但它们是 ITN 正在开展工作的自然延伸。因此，ITN 是一项对未来先进加速器技术至关重要的计划。

4 ILC技术网络

本文档由以下人员编写

Khaled Alharbi、Philip Burrows、Enrico Cenni、Yoshinori Enomoto、Angeles Faus- Golfe、Klaus Floettmann、ManuelFormela、JoeGrames、NiclasHamann、TimLengler、Benno List、Gregor Loisch、Dieter Lott、Peter McIntosh、Shinichiro Michizono（编辑）、Laura Monaco、Gudrid Moortgat-Pick、Tatsuya Nakada（编辑）、Toshiyuki Okugi、Samanwaya Patra、Sabine Riemann、Hiroshi Sakai、Peter Sievers、Nobuhiro Terunuma、Carmen Tenholt、Malte Trautwein、Grigory Yakopov、Akira Yamamoto、Yasuchika Yamamoto、Kaoru Yokoya,

ITN 成员包括

- 澳大利亚核科学与技术组织 Rohan Dowd
- 法国原子能和替代能源委员会 Stephane Berry、Enrico Cenni、Fabien Eozenou、Gregoire Jullien

- 欧洲核子研究中心 Steffen Doebert、ConradCallieri、Rogelio Tomas Garcia、Lewis Kennedy、Robert Kieffer、Kacper Lasocha、Andrea Latina、Wiktoria Malek、Matthias Mentink、Franck Peauger、Karl-Martin Schirm、Steinar Stapnes、Orson Vermare
- KEK Yuki Abe、Mitsuo Akemoto、Sora Arai、Dai Arakawa、Sakae Araki、Hayato Araki、Yasushi Arimoto、Alexander Aryshev、Rishabh Bajpai、TakeshiDohmae、Masato Egi、Yoshinori Enomoto、Masafumi Fukuda、Takeyoshi Goto、Takafumi Hara、Kazufumi Hara、Masahiko Hiraki、Teruya Honma、Hayato Ito、Eiji Kako、Hiroaki Katagiri、Ryo Katayama、Shiori Kessoku、Kiyoshi Kubo、Takayuki Kubo、Ashish Kumar、Masakazu Kurata、Shigeru Kuroda、Shuji Matsumoto、Toshihiro Matsumoto、Shinichiro Michizono、Takako Miura、Yu Morikawa、Hi- rotaka Nakai、Hiromitsu Nakajima、Eiji Nakamura、Kota Nakanishi、Toshiyuki Okugi、Mathieu Omet、Konstantin Popov、Takayuki Saeki、Hiroshi Sakai、Mo- toki Sato、Safwan Shanab、Hirotaka Shimizu、Nobuhiro Terunuma、Ryuichi Ueki、Kensei Umemori、Eric Viklund、Yuichi Watanabe、Tomohiro Yamada、Akira Yamamoto、Yasuchika Yamamoto、Kaoru Yokoya
- IFIC JuanCarlos、Javier Olivares Herrador、Eduardo Mart´ınez L´opez、Nuria Fuster Martinez、Laura Pedraza Motavia、Juan Fernandez Ortega
- IJCLAB DanielCharlet、Cedric Esnault、ZomerFabian、Angeles Faus Golfe、Anna Ko- rsun、Aurelien Martens
- 意大利国家核物理研究院米兰分部 Michele Bertucci、Elisa Del Core、Laura Monaco、Daniele Sertore
- 高丽大学 Hojun Jeong、Eun-San Kim、Byeong Rok Ko、Soohyung Lee,
- 汉堡大学 KhaledAlharbi、ManuelFormela、Niclas Hamann、TimLengler、GudridMoortga t- Pick、Samanwaya Patra、Malte Trautwein
- 牛津大学 DouglasBett、Philip Burrows、Pierre Korysko
- 英国科学技术设施委员会 Peter McIntosh

致谢

KEK 的 ITN 活动由日本文部科学省资助，资助编号为JPMXP1423812204，用于开发提升未来加速器性能的关键元件技术。ITN 的工作由欧盟地平线欧洲计划下的玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里人员交流计划资助，资助协议编号为101086276（EAJADE）。西班牙相关活动由科学、创新与大学部、瓦伦西亚自治区政府以及欧盟下一代计划资助。KEK 与欧洲核子研究中心（CERN）之间的合作工作协议（ICA-JP-0103）附录 26 为欧洲实验室参与 ITN 提供了框架，CERN 担任枢纽实验室。我们感谢 G. Taylor 仔细审阅本手稿，并提出许多意见和建议。

参考文献

[1] T. Behnke 等（编），《国际直线对撞机技术设计报告——第 1 卷：执行摘要》，arXiv:1306.6327 [physics.acc-ph。H. Baer 等，《国际直线对撞机技术设计报告——第 2 卷：物理学》，arXiv:1306.6352 [hep-ph]。C. Adolphsen 等，《国际直线对撞机技术设计报告——第 3.I 卷：技术设计阶段的加速器研发》；C. Adolphsen 等，《国际直线对撞机技术设计报告——第 3.II 卷：加速器基准设计》，arXiv:1306.6328 [physics.acc-ph]。T. Behnke 等，《国际直线对撞机技术设计报告——第 4 卷：探测器》，arXiv:1306.6329 [physics.ins-det]。[2]ILC 国际发展团队，《国际直线对撞机预备实验室（Pre-lab）提案》，arXiv:2106.00602 [physics.acc-ph[3] IDT 工作组 2，《ILC 技术网络（ITN）及工作包》，IDT-EB-2023-002，2023年，https://linearcollider.org/wp-content/uploads/2023/09/IDT-EB-2023-002.pdf。[4] H. Sakai 等，《国际直线对撞机加速器现状》，发表于第 16 届国际粒子加速器会议（IPAC2025）论文集，第 24 页，台湾台北，2025/06。[5] L. Monaco 等，《欧洲的 ITN 活动》，发表于 2025年 4 月在韩国大田举行的 TTC2025。https://indico.ibs.re.kr/event/846/[6] L. Monaco 等，《欧洲 ITN：协调一致地推进 ILC 技术开发》，发表于第 22 届国际射频超导会议（SRF2025）论文集，MOP39，日本东京，2025/09。[7] 欧洲 XFEL 合作组，《欧洲自由电子 X 射线激光器（XFEL）技术设计报告》，DESY 2006-097，ISBN 978-3-935702-17-1，2007年。[8] C. Pagani 等，《,,,,,,》，《先进低温工程》43A（1998）87–97。[9] Y. Yamamoto 等，《IDT-ADT 低温模块及辅助部件开发现状》，发表于 2025年超导射频会议论文集，日本东京，2025/09。[10] M. Omet 等，《KEK 的 ILC 原型低温模块子系统现状》，发表于 LCWS2025。西班牙瓦伦西亚，2025年。[11] T. Dohmae 等，《ITN 低温模块设计》，将在 LCWS2025 上发表，西班牙瓦伦西亚，2025年。[12] D. Kostin 和 W.D Moueller，《TTF 耦合器的现状及运行经验》，发表于 LINAC2004 论文集，吕贝克，2004年。[13] Y. Pischalnikov 等，《FNAL 原型低温模块的 LCLS-II 调谐器组件》，发表于 NAPC2016 论文集，芝加哥，2016年。[14] M. Omet 等，《KEK 的 ILC 原型低温模块子系统现状》，已提交至 LCWS2025，西班牙瓦伦西亚，2025年。[15] R. Ueki，私人通信，2025年。[16] Y. Arimoto 等，《国际直线对撞机主直线加速器中能够耐受暗电流加热的超导四极磁体系统设计研究》，IEEE《应用超导学汇刊》，第 33 卷，2023年。[17] T. Yamada 等，《用于 ILC 主直线加速器、结合偶极校正磁铁的铌钛传导冷却超导四极磁体开发现状》，发表于 IPAC2025 论文集，台湾，2025年。[18] Q. Duran 等，《具有较大温度裕度的 ILC 主直线加速器传导冷却超导四极磁体概念设计》，IEEE 应用超导学汇刊，第 35 卷，第 5 期，2025年。

[19] Q. Duran 等“ILC 主直线加速器传导冷却超导磁体组件温度裕度评估”，第17届欧洲应用超导会议（EUCAS）论文集，2-LP-AM2-70，2025年。[20] N. Fuster-Martinez 等“ILC 直线加速器再入式腔束流位置监测器的研发”，私人通信，2025年。[21] P. McIntosh 等，“ILC偏转腔”，载于 SRF’23 论文集，美国大急流城，2023年6月，第990–995页。[22] 《物理学简报》，CERN-ESU-004，https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.11[23] S.U. De Silva 等，“国际直线对撞机用 1.3 GHz 射频偶极偏转腔设计”，载于 LINAC’22 论文集，英国利物浦，2022年8月至9月，第832–834页。[24] R. Calaga，“高亮度大型强子对撞机用偏转腔”，载于 SRF’17 论文集，中国兰州，2017年7月，第695–699页。[25] S.U. De Silva 等，“电子-离子对撞机用 197 MHz 波导加载偏转腔设计”，载于 NAPAC’22 论文集，美国新墨西哥州阿尔伯克基，2022年8月。[26] P. Kneisel 和 J. Sekutowicz，“国际直线对撞机型腔体同轴耦合方案更新”，《物理评论：加速器与束流》，第13卷，022001页，2010年。[27] A. Yamamoto，“用于节约成本的新型 Nb 材料”，未来直线对撞机国际研讨会，SLAC国家加速器实验室，2023年5月。[28] R. Calaga、S. Belomestnykh、I. Ben-Zvi、J. Skaritka、Q. Wu 和 B. P. Xiao，“用于大型强子对撞机的双四分之一波偏转腔”，载于 IPAC’13 论文集，中国上海，2013年5月，第2408–2410页。[29]R. Calaga 等，“首次演示在强子束流中使用偏转腔”，《物理评论：加速器与束流》24，062001，2021年6月。doi: 10.1103/PhysRevAccel-Beams:24.062001。[30] B. Xiao 等，“布鲁克海文国家实验室电子-离子对撞机 197 MHz 蟹形腔的高阶模阻尼器设计”，SRF2021论文集，线上（密歇根州立大学），2021年6月，第624–626页。[31] Z. Conway 等，“准波导多单元谐振器的开发与测试结果”，IPAC14，德国德累斯顿，2014年6月，第2595–2597页。[32] A. Lunin 等，“用于 ILC 的紧凑型多单元超导偏转腔”，SRF’23论文集，美国大急流城，2023年6月，第521–523页。[33] A. Kumar 等，“用于 1.3 GHz 超导射频腔的直接切片中晶粒铌的机械性能”，SRF21，线上，MOPCAV004，第259–264页。[34] T. Dohmae 等，“使用从锻造锭直接切片的中晶粒铌圆盘制造 1.3 GHz 超导射频腔”，SRF21，线上，，第287–290页。[35] G. Myneni 等，“面向科学前沿与加速器应用的中晶粒铌超导射频腔制造技术”，发表于 SnowMass’21 AF-7 射频分组，2022年，并将于2023年发表于《仪器学报》。[36] P. McIntosh、B. Laxdal 等，“ILC偏转腔研发”，LCWS23报告。[37] C. Hernandez-Garcia、D. Bullard、J. Grames、G. Palacios-Serrano 和 M. Poelker，“用于高压直流电子枪的 500 kV 反向几何结构馈通件”，第5届 NAPAC2022，美国新墨西哥州阿尔伯克基，doi:10.18429/JACoW- NAPAC2022-WEPA16[38] B. Belfore 等，“通过 MOCVD 生长的高品质因数自旋极化电子源”，《应用物理快报》123，222102（2023）。doi:10.1063/5.0170106

[39] M. L. Stutzman、A. Engel、Y. Wu 和 C. Palmstrøm，“采用分子束外延生长的高极化 InAl-GaAs/AlGaAs 光阴极”，2024年极化源、靶与极化测量研讨会（PSTP24），弗吉尼亚州纽波特纽斯（2024年）。doi: 10.22323/1.472.0042[40] Y. Enomoto 等，“KEK iCASA 中 ILC 正电子源研发现状与计划”，PASJ2023论文集，日本船桥，2023年8月至9月，第766–768页。[41] Y. Morikawa 等，“ILC 正电子产生靶的开发”，日本粒子加速器学会第20届年会（PASJ2023），日本船桥，2023年8月至9月，FRP37。[42] Y. Morikawa 等，“ILC 正电子产生靶的开发”，日本粒子加速器学会第21届年会（PASJ2024），日本山形，2024年7月至8月，THOT09。[43] Y. Enomoto 等，“正电子源磁通集中器的开发”，PASJ2024论文集，日本山形，2024年7月至8月，第502–506页。[44] M. Fukuda 等，“用于 ILC 正电子捕获直线加速器的 L波段交变周期结构（APS）腔体设计”，PASJ2023论文集，日本船桥，2023年8月至9月，第985–989页。[45] M. Fukuda 等，“用于 ILC 正电子捕获直线加速器的 L波段交变周期结构（APS）腔体设计与制造研究”，PASJ2024论文集，日本山形，2024年7月至8月，第662–667页。[46] G. Moortgat-Pick、S. Riemann、P. Sievers 和 C. Tenholt，PoS EPS-HEP2023（2024），626[47]K. Fujii、C. Grojean、M. E. Peskin、T. Barklow、Y. Gao、S. Kanemura、H. Kim、J. List、M. Nojiri 和 M. Perelstein 等 [arXiv:1801.02840 [hep-ph]]；G. Moortgat-Pick、T. Abe、G. Alexander、B. Ananthanarayan、A. A. Babich、V. Bharadwaj、D. Barber、A. Bartl、A. Brachmann 和 S. Chen 等。《物理报告》460（2008），131-243 [arXiv:hep-ph/0507011 [hep-ph]]。[48] G. Moortgat-Pick、M. Formela、N. Hamann、T. Lengler、D. Lott、G. Loisch、S. Riemann、P. Sievers、C. Tenholt 和 G. Yakopov，《EPJ 网络会议录》315（2024），02002 doi:10.1051/epjconf/202431502002[49] K. S. R. Alharbi，“非理想国际直线对撞机螺旋波荡器对光子束参数的影响，以及波荡器壁免受同步辐射损伤的防护”，博士论文，汉堡大学，2024年。[50] K. Alharbi、S. Riemann、G. Moortgat-Pick、A. Alrashdi 和 A. Ushakov，PoS EPS-HEP2021（2022），867 doi:10.22323/1.398.0867。[51] G. Moortgat-Pick、M. Formela、N. Hamann、T. Lengler、D. Lott、G. Loisch、S. Riemann、P. Sievers、C. Tenholt 和 G. Yakopov，PoS ICHEP2024（2025），841 doi:10.22323/1.476.0841[52] T. Lengler、A. Thiebault、A. Ushakov、B. Geoffroy、C. Le Galliard、D. Lott、E. Voutier、F. Gauthier、G. Moortgat-Pick 和 J. Grames 等，JACoW IPAC2024（2024），TUPC81 doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUPC81[53] K. Kubo，“国际直线对撞机阻尼环设计：相较于技术设计报告的变更”，LCWS2025报告。[54] T. Okugi 和 ATF国际合作组，“ATF2 束流线处小束流尺寸的实现”，LINAC2016论文集，MO3A02（2016），doi:10.18429/JACoW-LINAC2016-MO3A02。[55]ATF合作组，“ATF 2020年报告”，https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_评审_报告_2020_0831.pdf。

[56]R. J. Apsimon 等, “国际直线对撞机相互作用点束流碰撞反馈系统原型的设计与运行”, Phys. Rev. Accel. Beams **21**, 122802 (2018), doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.122802.[57] D. R. Bett 等, “亚微米分辨率、逐束团束流轨迹反馈系统及其在降低单程束流线尾场效应中的应用”, 《仪器学报》 **16** P01005 (2021), doi:10.1088/1748-0221/16/01/P01005.[58] P. Korysko, “加速器测试设施2中的强度相关效应及其向未来正负电子直线对撞机的外推”, 博士论文, 牛津大学 (2020)。[59] Y. Abe, “纳米级小束流尾场效应的评估”, 博士论文, 加速器科学系, 综合研究大学院大学 (2024)。[60] Y. Abe 等, ”ATF最终聚焦束流线升级的尾场抑制评估”, LINAC2024会议论文集, TUAA007(2024), doi: 10.18429/JACoW-LINAC2024-TUAA007.[61] M. Kurata, “KEK的机器学习”, LCWS2024报告。[62]J. Edelen, “基于逆模型的束流线光学误差检测”, doi:10.1088/2632-2153/ae0f71.[63] E. Fol等, https://indico.gsi.de/event/10458/contributions/45015/attachments/31657/40080/Mitigation_Approaches_Workshop_ML.pdf.[64]R. Yang 等, “KEK加速器测试设施2中的超低 β^* 光学调谐”, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 071003 (2020), doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.071003.[65] https://hal.science/hal-05132589v1.[66] S. Jang 等, “STF用L波段腔式束流位置监测器的研制”, 第10届国际粒子加速器会议论文集, WEPGW034 (2019), doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPGW034.[67]L. K. Pedraza 等, ”ILC主直线加速器用腔式束流位置监测器：现状与计划”, LCWS2024会议论文集, doi:10.1051/epjconf/202431502005.[68] L. K. Pedraza 等, ”面向未来直线对撞机的高分辨率腔式束流位置监测器数据采集系统的开发”, 第16届国际粒子加速器会议论文集, THPM059 (2025), doi: 10.18429/JACoW-IPAC25- THPM059.[69] M. Bergamaschi 等, “利用非相干切伦科夫衍射辐射进行非侵入式束流诊断的近期成果”, 第10届国际粒子加速器会议论文集, WEPGW077 (2019), doi:10.18429/JACoW-IPAC2019- WEPGW077.[70] O. Vermare, “可见光波段切伦科夫衍射辐射的绝对测量”, 硕士论文, 瑞典皇家理工学院工程科学学院（SCI）, 瑞典斯德哥尔摩 (2025), https://urn.kb. se/resolve?urn= urn:nbn:se:kth:diva-368649.[71] H. Yamaoka, https://doi.org/10.50868/pasj.16.2_87.[72] P. Satyamurthy等, “用于国际直线对撞机500GeV电子/正电子的18MW涡流式水束流倾倒器设计”, NIM A 679 (2012) 第67–81页。