MITICA实验中ITER加热中性束注入器原型的1 MV电源局部放电检测

Marco Boldrin[a]、Mattia Dan[a]、Vanni Toigo[a,b]、Loris Zanotto[a]、Paolo Barbato[a,b]、Lucio Baseggio[a]、Manola Carraro[a,b]、RaffaeleGhiraldelli[a,b]、Enrico Zerbetto[a]、Stefano Malgarotti[c]、Alberto Rizzi[c]、Giuseppe Rizzi[d]、Hans Decamps[e]、Hiroyuki Tobari[f]

[a]*RFX*联盟（*CNR*、*ENEA*、*INFN*、帕多瓦大学、*Acciaierie Venete SpA*），*Corso Stati Uniti 4*，*35127* 帕多瓦，意大利[b]等离子体科学与技术研究所，*CNR*，帕多瓦，意大利[c]*CESI S.p.A.*，*Via Rubattino 54*，*I-20134* 米兰，意大利[d]*CESI S.p.A.* 顾问[e]*ITER*组织，*Route de Vinon-sur-Verdon*，*CS 90 046*，*13067 St. Paul Lez Durance Cedex*，法国[f]日本国家量子与放射科学技术研究所，*Mukouyama 801-1*，*Naka 319-0193*，日本

MITICA（Megavolt ITER Injector& ConceptAdvancement，ITER加热中性束的全尺寸原型）正在中性束测试设施（帕多瓦，意大利）建设。其设计目标是向ITER等离子体输送16.5 MW的功率：将负氘离子加速至1 MeV，使总离子电流达到40 A，然后进行中性化。

MITICA加速电源由若干非标准设备组成，其绝缘电压等级（-1 MVdc）和尺寸均超出工业标准。

耐电压试验（最高达 1.265 MVdc）分五个连续阶段进行（从 2018 年至 2019 年），根据安装进度，在连接属于不同采购项目的设备之后开展。

在始于2021 年的集成调试期间，高压装置的某个尚未确定的位置发生了两次击穿，因此这些击穿可能发生在空气中，也可能发生在六氟化硫中。为确定可能存在绝缘薄弱点的位置，首先对空气绝缘部件中现有的局部放电检测诊断技术（击穿的前兆）进行了改进，具体包括一套仪器设备，例如电容式探头和用于交流应用的现成仪器（声学传感器和电磁传感器）。

本文介绍了仪器鉴定工作，以评估其是否适用于直流运行，并进一步介绍了在 MITICA 中开展的研究，具体包括：

1）灵敏度评估试验，通过人工产生电晕效应，确定每种诊断技术的最低阈值

2）向 MITICA 设备施加电压，将仪器在设备周围移动，并逐步升高电压，寻找电晕现象，以识别可能存在的绝缘薄弱点。

关键词：ITER、PRIMA、MITICA、加热中性束注入器、高压电源、绝缘设计、局部放电检测

1 引言

ITER等离子体的燃烧条件和构型控制通过包括两个加热和电流驱动中性束注入器（加热中性束注入器）在内的附加加热系统实现。每台设备的设计功率为 16.5 MW，其实现方式是将负氘离子加速至 1 MeV，总离子电流达到 40 A（870 keV 时氢离子电流为 46 A），随后进行中性化，束流开启时间最长可达 1 小时 [1]。为了及时满足 ITER 运行所需的极高性能要求（迄今尚未同时实现），正在帕多瓦（意大利）RFX联盟所在地建设一座专用的中性束测试设施（NBTF），称为 PRIMA（帕多瓦兆伏加速注入器研究）[2] 。PRIMA 包含两项实验：SPIDER（射频等离子体提取氘离子源）自 2018 年 6 月起运行，是负离子源的全尺寸试验台，粒子能量为 100 keV；MITICA（兆伏 ITER 注入器与概念推进）是按 1:1 比例建造的ITERHNB原型，旨在测试 H^- 和 D^- 离子的产生、提取、加速和中性化。MITICA电源（PS）是一个复杂系统，采用多种绝缘技术（油、SF_6, 空气、真空），并由若干超出工业绝缘电压等级（-1 MVdc）和尺寸标准的非标准设备组成（见图1）：

- 加速栅极电源（AGPS，见图1中的细节1）[3], 向静电加速器的电极提供低至-1MV的直流电压，该加速器由五台串联连接的-200kV直流发电机（DCG）组成；每台直流发电机均由一台三相升压油绝缘变压器组成，其高压输出经由一个安装在SF_6 加压罐内的三相二极管桥整流；直流发电机输出导体通过 SF_6 气体绝缘线路连接至一个 RC滤波器单元（DCF，细节2）；
- 一个大型-1MV直流空气绝缘法拉第笼，高压平台1（HVD1，细节3）[4][5], 承载 ISEPS,

作者邮箱：marco.boldrin@igi.cnr.it

离子源与引出电源系统[6] 为离子源提供电力，以产生并引出负离子；ISEPS 由绝缘变压器（详图4）[7] 供电，其输出导体从HVD1经空气至SF_6 套管（高压套管组件，HVBA，详图 5）引至输电线（TL）；这些采用空气绝缘的设备安装在高压大厅（HVH）内，环境条件（空气温度、湿度和粉尘水平）受到控制 [5];

- 最后，采用 SF_6（绝对压力为 0.6 MPa）绝缘的 100 米长输电线（细节6）由3个相继区段（TL1至TL3 [3]）组成，通过SF_6至真空高压套管（HVB，细节7），将加速栅极电源和ISEPS连接至安装在MITICA容器（细节8）内的束源。在绝缘与综合测试期间，临时将短路装置（SCD）安装在束源的位置。SCD在SF_6中以0.13 MPa绝对压力绝缘，配备五个可移动火花隙，用以模拟栅极击穿（击穿）；五个固定并联火花隙将电压限制在HVB允许值以内（总计-1 MVdc，每级200 kV）。

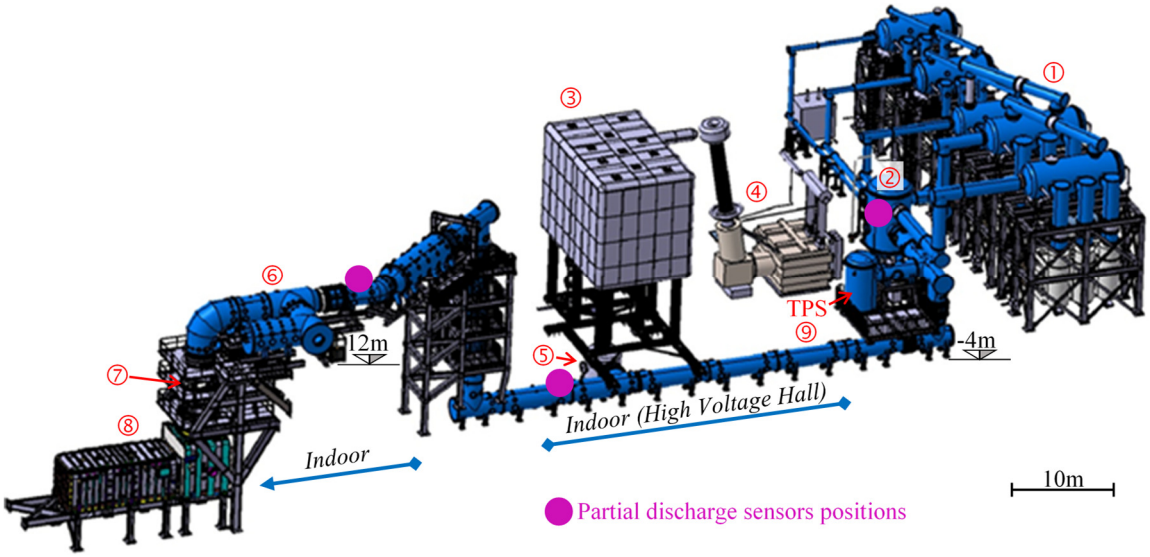


图1 MITICA电源系统总览。

2 绝缘与综合测试问题

由欧洲（EUDA）和日本（JADA）国内机构（DA）采购的设备，在交付至PRIMA场址之前，已在工厂成功完成验收测试，测试对象为缩小尺寸的模型（HVD1 [5]）或全尺寸样品（[3], HVBA [5]）。MITICA电源系统已于2016年至2019年完成安装，并根据安装进度以及在连接属于不同采购项目的设备之后，于2018年9月至2019年11月分五个后续步骤进行了高压耐受测试（包括三次连续电压施加：1.2 MV × 1 h、1.06 MV × 5 h，在5 h施加之后于1.265 MVdc水平施加5个峰值 [3]）。测试以远程方式进行，使用测试电源（TPS）发生器（额定值为1.3 MV、10 mA，见图1中的细节9）施加电压，顺序如下：

1)直流发电机测试（输电线断开）；2)输电线1+输电线2+输电线3测试（从本次测试起断开直流发电机）；3) HVD1+HVBA测试（仅进行1.2 MV × 1h），用于HVD1+HVBA部分验收；TPS通过TL1连接，输电线2+输电线3也已连接；4) HVD1+HVBA+绝缘变压器测试；TPS通过TL1连接，输电线2+输电线3也已连接；5) 高压套管测试，限制为1 MVdc × 1 h，以适应其电压耐受能力；TPS通过TL1连接，输电线2+输电线3+HVD1+HVBA+绝缘变压器也已连接，静电终端（SCD）安装在MITICA容器内。

关于诊断，SF_6 绝缘设备（主要是输电线）配备了3个嵌入式局部放电（PD）探测器，基于超高频（UHF）原理，并采用专有软件进行信号处理和评估；这些探测器沿输电线路径分布，如图1所示。HVH由视频监控系统监测，该系统包括两台可见光固定摄像机（即图2中的“2+M”和“5”，前者配有环境麦克风）以及一台特殊的紫外（UV）[8] OFIL DayCor 云台摄像机（图2中的“UV”），用于检查空气绝缘设备及其周边环境，以识别局部放电的潜在来源——击穿的前兆。MITICA电源系统的综合调试于2021年开始，使用AGPS模拟负载（图2中的“DL”）。该负载由一组置于空气中的高压电阻构成，并设有连接抽头，可连接至HVD1，用于现场测试AGPS性能；它为此目的临时安装在HVH内。在如此大型的中性束注入系统中，首次尝试成功实现了持续1000秒的700 kV脉冲，这对ITER/DEMO而言是一项重要成果；然而，随着测试工作的推进，在更高电压下，高压设备中的某处发生了两次击穿，可能发生在空气中，也可能发生在SF_6，中，但未能明确判定其具体位置。

由现有诊断技术系统提供的信号。

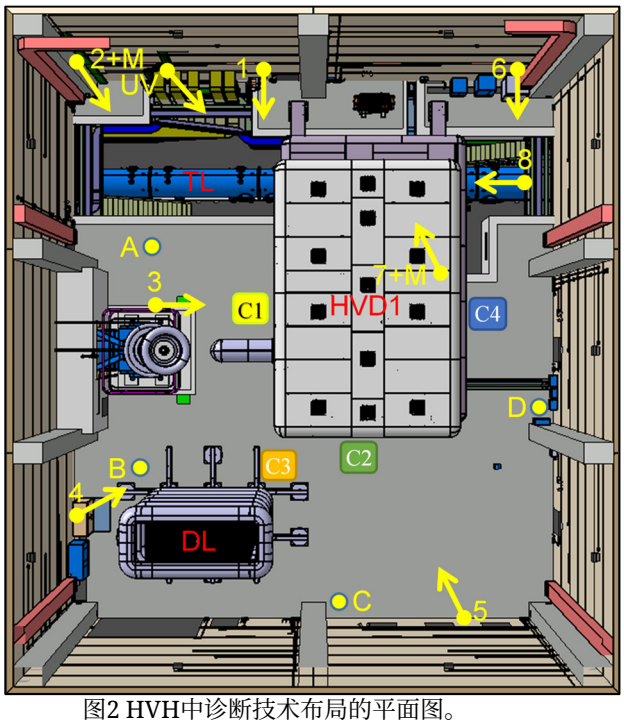


图2 HVH中诊断技术布局的平面图。

3 局部放电检测改进

3.1 仪器的选择

为确定空气绝缘部件中绝缘薄弱部位的位置，已选用一套适合检测直流电压下电晕的仪器。电晕效应与光（可见光和紫外光范围）及声发射、电荷释放（由电场变化引起）和臭氧生成有关。在交流应用中，有多种现成的电晕检测解决方案；在这类应用中，电晕脉冲呈周期性产生，并可与电压正弦波形（局部放电相位分辨模式）相关联，从而识别产生电晕的缺陷类型。对于直流应用，电晕/局部放电的重复率通常较低，且往往伴随着相当两次连续脉冲之间的时间间隔很长，对相同测量系统的使用经验非常有限，因此有必要进行检查，以验证仪器的适用性。确定了以下候选仪器：

a)声学传感器：所选用的现成解决方案是NL摄像机[9]，，配备由124个麦克风组成的矩阵，用于捕捉电晕现象发出的声音，并在摄像机的监视器上即时显示声源位置；该仪器安装在三脚架上，配有摄像头，以便在测试期间将HVH外部、隔离区域的画面显示在MITICA 控制室中，用于在线监测（见图 3）；

b) 电磁传感器：所选仪器（配备 DA100 定向天线 [10] 的 DOBLE PD 测量系统 PDS100 ）在射频（RF）范围（50MHz -1000 MHz）内搜索局部放电（PD），并显示局部放电源产生的 RF 信号的“特征图”（电晕通常位于500MHz 范围内）；在此情况下，该仪器及其天线也由配备摄像机的三脚架支撑，以显示特征图；

c)电容式电场探头由一个电压单元组成（即电容式电压分压器的“低电压”支路，其“高电压”支路是电场探头与带电压电极之间的杂散电容），用于感测电极电场的变化，这些变化可能源于施加电压的变化，也可能是由于探头前方的空间电荷引起的；CESI曾将类似的电容式电场探头用作线性电压分压器[11], [12]。用于测试的探头由一块正反两面均覆有铜层的方形印制电路板制成，中心钻孔，以便将两个金属面连接至一根 RG-58 电缆。制作了不同的样品，最终选定用于实际应用的探头尺寸为 53 cm x 61 cm，实测电容为 9.5 nF。

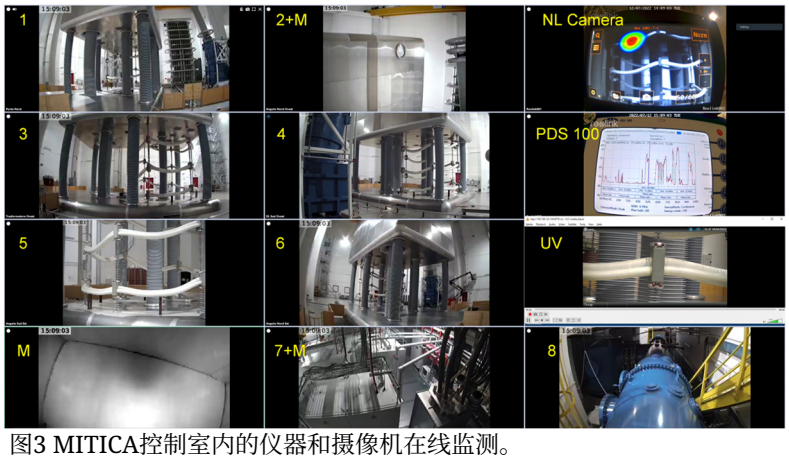


图3 MITICA控制室内的仪器和摄像机在线监测。

3.2 仪器验证与视场评估

首项活动旨在验证所确定仪器的正常运行，这些仪器用于检测电晕直流应用中的检测。NL摄像机（A）、PDS100（B）、DayCor摄像机（C）和电容式场探头（D）安装在一个尖端前方，该尖端由负直流电压发生器供电，以产生电晕效应（见图4）。

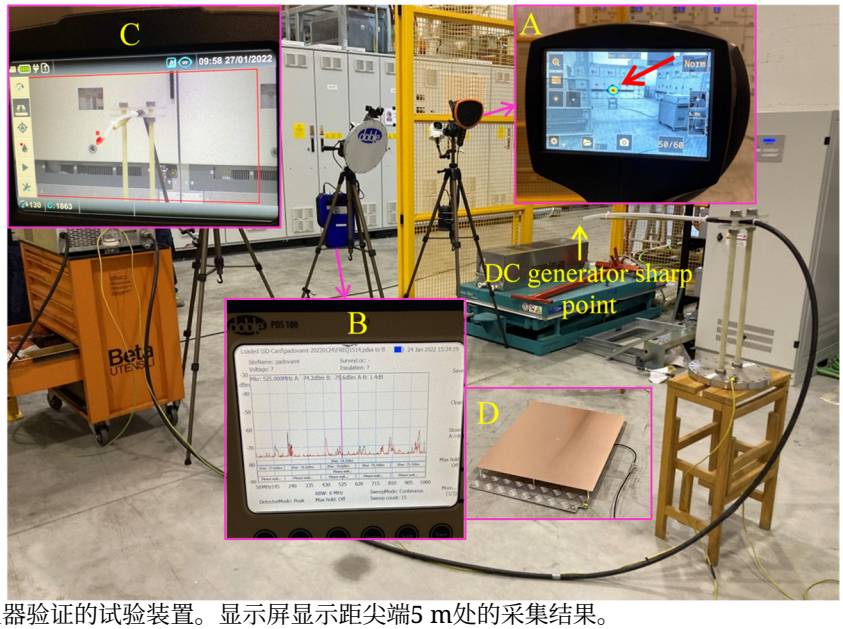


图4 仪器验证的试验装置。显示屏显示距尖端5 m处的采集结果。

首次扫描时，仪器A、B和C位于距局部放电源约1.5 m处；随后将它们移至距尖端约5 m处，并再次进行测量。两种情况下，尖端均由-40 kV电压供电。所有仪器均表现出相近的灵敏度，在-27 kV时检测到“电晕”起始；两种源距下的熄灭电压均为-20 kV。如图4所示，NL摄像机（A）用彩色区域标出电晕源（尖端），而DayCor摄像机（C）则在背景环境图像上叠加红点云，指示缺陷源。需要注意的是，DayCor摄像机也会检测到空气中的自然活动，因此即使没有电晕现象，屏幕上也可能出现一些红点，但这些红点分布较为稀疏，数量也很少。PDS100（B）的屏幕则显示采集信号曲线（黑色）相对于背景噪声（红色）的变化；背景噪声是在施加电压前仪器就位后记录的。首先，通过记录电容式场探头对阶跃电场的输出信号，对该探头进行了表征。该阶跃电场由施加直流电压至安装在电容式探头上方50 mm处的一块金属板产生。直流发生器的阶跃电压设为-250 V。图5显示，场探头信号衰减至零电压所需的时间（~ 10 ms）由探头电容（9.5 nF）和数字示波器的输入电阻（1 MΩ）决定。将电容式场探头安装在距连接至直流电压发生器的尖端约1 m处（见图4）后，其输出信号在电压达到20 kV之前（正确地）保持为零；随后，随着施加电压升高并出现电晕，输出信号上升至数十毫伏的负值。对记录信号进行更精确的分析后发现，这是由于连续两个电晕脉冲之间的间隔很短，短于电容式探头的特征放电时间，因此测得的平均值略微偏离零。上述测试表明，所选仪器检测直流电场中产生的“电晕”效应的能力。

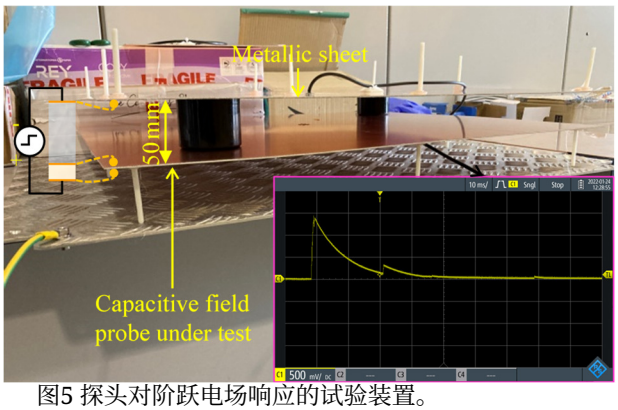


图5 探头对阶跃电场响应的试验装置。

还进行了附加试验，以确定NL摄像机和PDS100的视场。

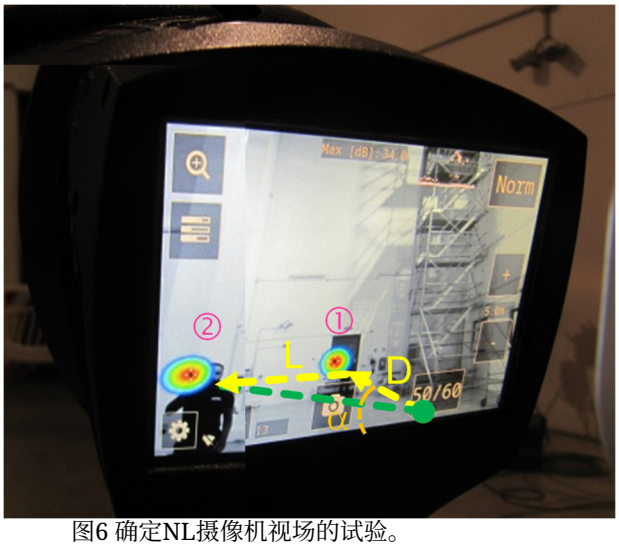


图6 确定NL摄像机视场的试验。

这是通过使用市售压电式燃气点火器完成的；点火器启动后会产生数个“微小”火花，发出声音并改变了♀♀♀♀

电场。对两种仪器依次进行，将打火机与设备轴线对齐，置于HVH内可用的最大距离“D”（约14 m）处，从而验证了传感器探测该事件的能力（见① 图6中的NL摄像机）。随后将打火机水平移出轴线并重复试验，以确定传感器能够探测该事件的最大水平距离“L”（见② 图6中的NL摄像机）。计算了相应的角度α；每个传感器的视场（相当于α的两倍）分别确定为NL摄像机60°和PDS100 130°。

4 高压试验

4.1 试验程序

试验 [13] 通过TPS为装置通电进行，此前已断开直流发电机和绝缘变压器，因此其配置与耐压试验5（见第2节）相当类似，并将最大施加电压限制为-1MV直流电压。考虑到HVH内部需要监测的巨大空间以及仪器的有效视场，诊断设备（NL摄像机和PDS100）被安装用于监测有限区域；总共选定了4个点来监测整个装置（图2中从“A”到“D”）。可见光视场中的固定摄像机增加至6台（在图2中增加了摄像机1、3、4、6），沿HVH周边分布，与DayCor摄像机一起覆盖整个装置。以下试验程序被确定为指导方针；根据试验结果，经参加试验的各团队协商同意后，可以进行偏离：

1) 将诊断设备置于位置“A”，以100 kV为步长逐渐将电压从0升高至300 kV，每个电压阶梯至少保持10分钟，以检测电晕活动；若未检测到电晕，则继续升高电压进入下一步；否则将电压降至零，并检查设备以确定电晕或电离的原因，在再次升高电压之前解决该问题；

2) 随后，需将诊断仪器移至后续位置（图2中的“B”至“D”），并重复执行第1点所述的电压施加序列；其余位置也应进行相同操作；3) 完成所有位置的测试后，需以100 kV为步长，将电压从300kV进一步升高至600 kV，并对所有位置重复测试；4)完成第3点后，需将电压从600 kV升高至700 kV，然后将步长幅值减小至50 kV，升高至800kV；5) 最后，需将仪器依次置于HVH内部的四个观测点，逐步将电压从800 kV升高至1000 kV，以完成测试序列。

4.2 测试结果

第一次测试于1月 24th 至1月28th 2022期间进行。仅使用了图2中的两个电容式场探头C1和C3，其信号通过远程控制的数字示波器采集。在达到500千伏几分钟后，TPS电流出现异常，电压降至零。测试期间未观察到“电晕”或其他现象的迹象。图7显示了500千伏下最后获得的数据：需要指出的是，NL摄像机始终在HVD1底部一侧显示一个（两个）彩色区域（取决于观察点），但经澄清，这种噪声由HVD1冷却装置产生，与任何局部放电产生均无关联，因为即使未施加电压，这些噪声也出现在相同位置。



图7 500千伏测试。

TPS维修和全厂检查后，第二轮测试于3月28th 至4月1st 2022进行。诊断系统进行了改进，包括：

– 两个额外的电容式场探头，总数达到4个：其中3个位于地板上，分别对应HVD1的三个侧面（图2中的“C1”、“C2”、“C4”），第四个（“C3”）位于DL下方；这些探头的信号通过同轴电缆传送至一台示波器的4个输入端，该示波器位于探头“C2”附近，分别是以图2表示，使用与示波器波形相同的颜色；

– 一台摄像机，其可见光视场对准容器内的SCD，以及沿全厂分布的其他电气测量设备（分压器和电流传感器）；

– 在控制室的屏幕上显示 TPS 电压和电流信号，以及去矿化水电导率的趋势

流经 HVD1 绝缘断口内部的冷却水 [4] （电导率过高会导致 TPS 失去电压控制）。

经协商同意偏离试验程序：在仅将PD诊断仪器保持在一个位置（图2中的“D”）的情况下，电压以100千伏为步长升高至500千伏；对于所有其他位置，试验均直接从600千伏的电压水平开始。

对场探头信号的分析使得能够识别出记录中的三种典型模式，尽管并未在每个位置、且在完全相同的电压水平下均能重复出现：

- 四个场探针信号的振荡（见图 8）：四个信号以约 1.8s 的“周期”振荡，但更靠近DL 的探针 3的信号振幅较小；这些振荡可能与TPS对施加于HVD1的电压进行的调节有关，该电压由充当分压器低压支路的探针测量，而分压器则由探针对 HVD1 的杂散电容补足；

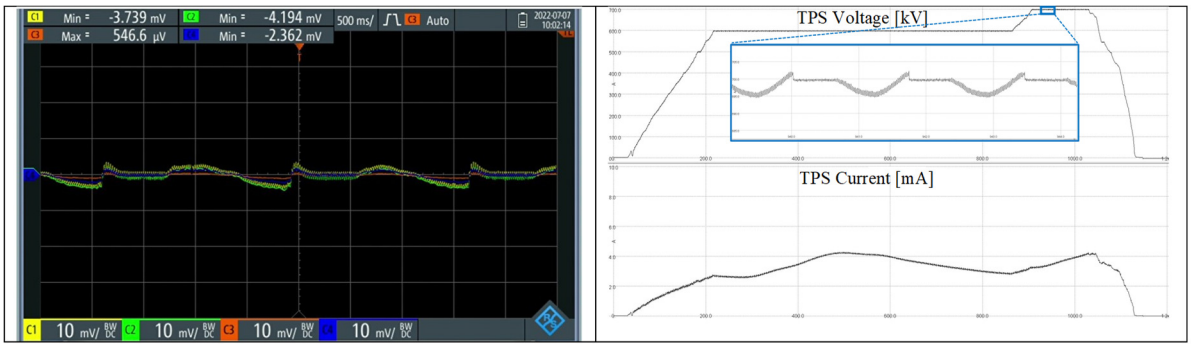


图 8 场探头（700 kV时的振荡）和 TPS V-I 信号。

- 场探头信号几乎相同且接近零值：经调查后明确，这种行为发生在由于水劣化导致水电导率升高时，TPS电流超过了设定阈值，因此输出电压略有下降（见图 9 中的红色矩形框，TPS 从电压控制切换为电流控制）；

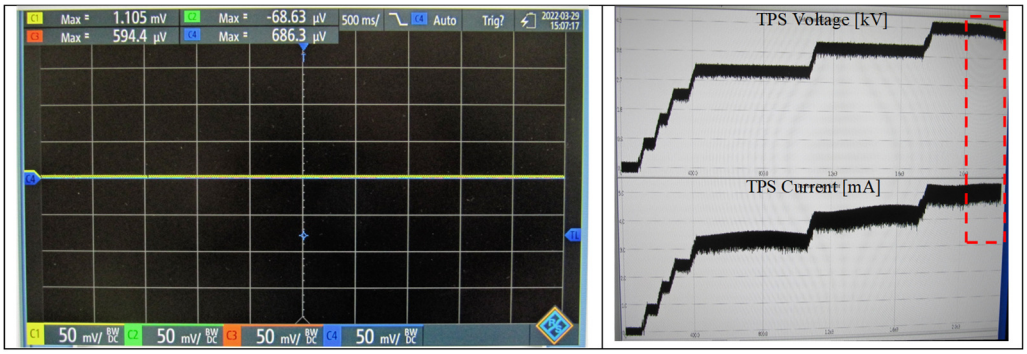


图 9 场探头（10 分钟后达到 600 kV）和 TPS 电压-电流信号。

- 一个场探头信号发生偏移：从约 700 kV 开始，随机观察到 C2 场探头的信号发生偏移，而其他场探头的信号则继续围绕零值振荡（见图 10 左图）。C2 曲线的偏移幅度并不固定，范围为 1 至 15 mV，与 TPS 施加的电压没有明显相关性。为解释电容式探头（距离 HVD1 冷却水绝缘管最近的探头）信号偏移，提出了一些假设：电晕效应，由于非电离现象引起的电场分布持续变化、测量误差。通过分析其他局部放电诊断技术（NL摄像机和PDS100）在不同观测位置的测量结果，未发现电晕证据（见图10中位置C的中图和右图），因此探头指示的电晕效应被认为不太可能，对偏移原因的理解留待进一步验证。

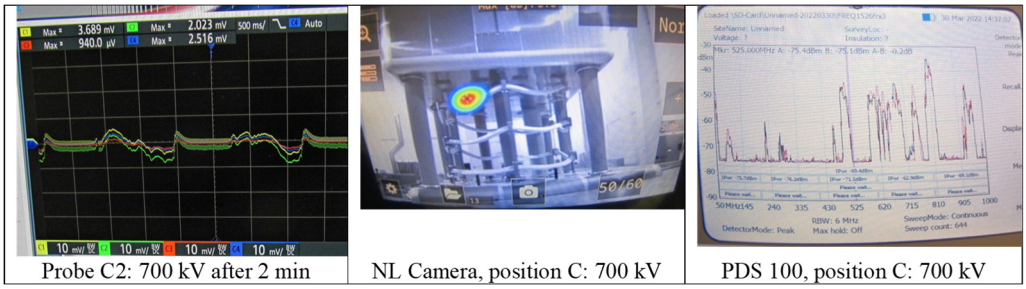


图 10 C2 场探头（在 700 kV 时发生偏移）和局部放电测量。

在本次试验中达到了900 kV的电压。目标是将电压维持10分钟，但由于TPS达到过高的电流阈值，试验在数分钟后停止。在恢复低水电导率后，在新的升压阶段出现了很大的噪声

在 870 kV 时听到了来自HVH的声音，随后电压降至零。此外，拍摄 SCD的摄像机捕捉到了容器内部的闪络。诊断系统在故障发生前未显示任何预放电迹象（图 11）。

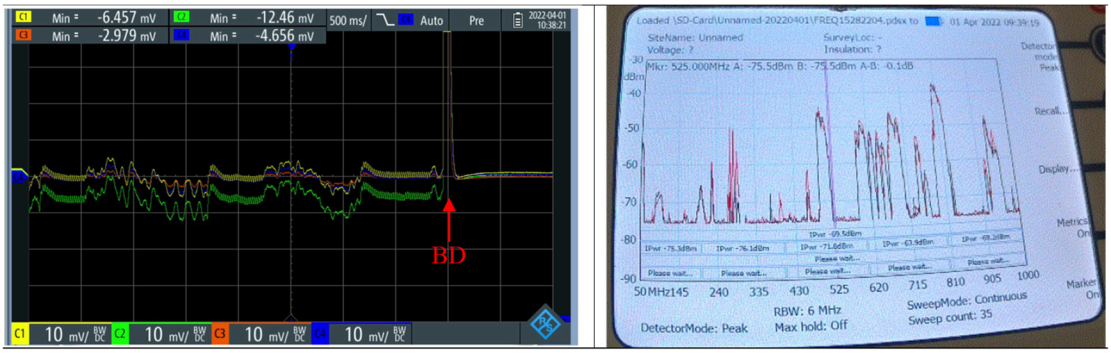
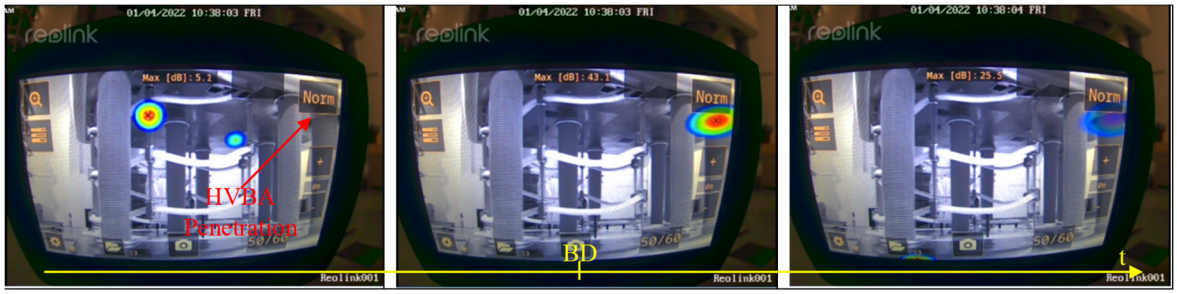


图11 击穿瞬间的场探头和 PDS 100（位置 D）。

只有NL摄像机（见图12，从左到右的时间序列）能够在事后分析中识别声源的变化：在击穿之前，可以看到通常的声源；而在闪络发生时，穿透部位出现了一个新的重要声源

HVD1 中HVBA 的（声音强度显示在顶部位置）。帧序列的比较表明，声音是从 HVBA 传播到 HVH，而不是反向传播的。



F图 12 NL摄像机（位置 D）在击穿事件时的帧序列 ent.

收集到的信息相互矛盾，事实上无法对该事件作出明确解释：

• PDS100和NL摄像机未检测到预放电现象；

• DayCor摄像机未发现电离现象，结合前一项的观测结果，表明空气绝缘设备发生击穿的可能性不大；

• 观察容器内部的相机所获取的图像证实，SCD 的电极之间发生了电弧；

• SCD电极之间的电弧也通过与SCD接地连接串联的电流测量得到确认。

尽管如此：

• SCD上的电弧可能是由装置其他位置发生的主击穿所引起的过电压诱发的（次级击穿）；

• 从HVD1内部的HVBA贯穿处向HVH传播的强烈声响迹象可能表明，击穿发生在HVH周围，而不一定发生在空气中；

• 嵌入式局部放电检测器（系统未进行直接在线监测）检测到在击穿前 TL2 和输电线3中存在一些活动，这一信息得到了证实

SF_6 绝缘中初级击穿的假设

。无论如何，对空气绝缘设备以及气体绝缘部件内部进行的检查均未发现放电迹象。

为加深对相关现象的理解（专用电路建模与仿真结果见[14] [15] [16]），第三次试验活动已于12^{th} 至 18th 2022年7月~~开展。SCD固定火花~~隙距离已增大，因为先前配置非常接近标称（-1 MV）电压限值（固定火花隙在耐压试验5期间确实并不存在，见第2节）。诊断系统通过增加以下内容得到了进一步改进：

– 可见光视场中的一台配备麦克风的摄像机（图2和图3中的“7+M”），用于检测HVD1内部产生的任何光或声音；– 安装在容器附近的一只麦克风（图3中的“M”），用于检测容器内部放电产生的声音；– 用于观察SCD固定火花隙的高速摄像机；– 6 沿厂区安装的环境麦克风，试图确定与击穿事件相关的声音发生位置及其沿着

工厂，
– 其他电气测量（主要是 TL 储罐周围的电流传感器）。

为了解前一次测试中 C2场探头信号发生偏移的原因，本次测试开始时，将所有局部放电诊断仪器（PDS100、NL 和 DayCor摄像机）安装在探头前方的 C 位置，以区分由电晕起始引起的信号漂移与由耦合或干扰引起的信号漂移。测试电压每次逐步升高 100 kV，每个电压档位维持数分钟，直至升至 700 kV，并保持 10 分钟。探头信号未检测到任何偏移，仅显示 TPS 施加到 HVD1 上的电压纹波（参见图 8）。

将仪器移至 D 位置和 B 位置，并直接升压至 600 kV 和 700 kV，分别保持 10 分钟，也确认了这一电压水平。仪器保持在 B 位置时，施加了 900 kV 电压并持续 23 分钟，这是 TPS 高电流阈值触发前所能维持的最长时间。施加电压期间，PDS100 在约 500 MHz 处检测到一些局部放电暂态活动，DayCor摄像机也捕捉到几个光点；数分钟后，信号恢复至背景噪声水平。

测试在较低的水电导率下重复进行；电压以线性方式（~100 千伏/分钟）升高至500千伏，随后保持至少2分钟，并在600千伏和700千伏下重复相同的步骤；然后以50千伏为步长，每次保持2分钟，电压升高至850千伏，但在2秒后因发生击穿而骤降。

至于之前的测试阶段，数据分析无法得出明确的解释，因为：

• PDS100、NL和DayCor摄像机均未检测到空气绝缘设备上的击穿先兆；
• 静态摄像机拍摄的容器内部图像，以及与SCD接地连接串联的电流测量结果，证实SCD电极之间发生了电弧，持续了数百微秒；与该电流相关的任何电晕现象，都必须通过专用诊断技术进行检测；

• 在 HVH 内记录到了很强的声音（但新摄像机“7+M”排除了该声音源自 HVD1 内部的可能性），新麦克风“M”也在容器附近记录到了声音；

• 声音由 6 个环境麦克风捕获，但在相同的开始时间所有麦克风都发生了饱和，因此无法辨别声源位置；

• 嵌入式探测器主要在击穿前于 TL2 中检测到了一些局部放电活动；
• 装置沿线的额外电气测量模式与高压导体和回流线之间发生放电相吻合，该放电很可能发生在SF_6绝缘设备中。

所有这些发现都无法帮助我们理解是否…无法确定 SCD 电弧是主要事件，还是由装置其他位置发生的击穿所引起的。不过，根据局部放电诊断技术测量结果和 HVH 摄像机记录，可以排除击穿发生在空气绝缘上的可能性。

对气体绝缘部件进行的目视检查发现，SCD固定火花隙上存在放电痕迹，主要位于1–0.8 MV和0.8–0.6 MV级；在其余SF_6绝缘部件以及空气绝缘部件中，未发现其他放电迹象。

5 结论

MITICA综合调试于2021年启动，首次尝试即在如此大型的中性束注入装置上顺利达到700 kV × 1000 s，这对ITER/DEMO而言是一项重要成果；然而，高压装置中某处发生了两次击穿，或在空气中，或在六氟化硫中，现有的一套诊断技术未能提供关于来源的明确证据。

为确定导致电压击穿发生的可能薄弱绝缘点的位置，通过在交流应用的现成解决方案中识别出一套合适的仪器，MITICA 对空气绝缘部件的局部放电检测进行了改进。还开展了专门工作，以验证这些仪器在直流条件下进行局部放电检测及其视场的正确运行。

考虑到需要监测的HVH内部空间巨大，而仪器的有效视场有限，因此安装了诊断设备以监测有限区域；总共选择了4个点，以监测HVH内部的整个装置。四个电容式场探头布置在地板上，分别对应三个HVD1侧面，第四个则位于DL下方。

2022年开展了三次测试活动。测试期间收集的信息并未得出确切结论，但根据局部放电诊断技术测量结果，至少可以得出结论：击穿极不可能发生在空气绝缘设备中。

进一步的试验活动计划于2023年在MITICA开展。鉴于已确定的局部放电仪器已被证明在直流空气诊断中有效，将研究并优化一套最终安装方案（在MITICA以及未来的ITER加热中性束注入器中），用于系统击穿的检测与防护。此外，将研究在SF_6绝缘部件上实施非侵入式局部放电检测的可能性（借助将安装于设备罐体上的传感器），以为即将开展的试验活动做准备，从而改进薄弱绝缘点的检测，这对于试验活动本身或在未来加热中性束注入器运行期间提高系统可靠性都是必要的。

MITICA正在履行其使命，识别并解决高电压非标准部件集成过程中不可预测的问题。在处理前所未有的高电压等级方面积累的经验教训，将为未来在ITER中的运行提供便利。

致谢与免责声明

本项工作是在 ITER-RFX中性束测试设施（NBTF）协议框架内开展的，并获得了 ITER 组织的资助。本文所表达的观点和意见不一定反映 ITER组织的观点和意见。本项工作是在EUROfusion 联盟框架内开展的，该联盟由欧盟通过欧洲原子能共同体研究与培训计划资助（资助协议编号101052200——EUROfusion）。然而，本文所表达的观点和意见仅代表作者本人，不一定反映欧盟或欧盟委员会的观点和意见。欧盟和欧盟委员会均不对这些观点和意见承担责任。

参考文献

[1] ITER 技术基础，IAEA，维也纳，2002年，ITER EDA，文件系列第24 号，装置描述文件，第2.5.1 节。[2] V. Toigo等，《ITER 中性束测试设施的进展》，《核聚变》59（2019）。[3] H.Tobari 等，《ITER 中性束测试设施直流1 MV 电源系统的完成》，第 28 届 IAEA 聚变能会议（FEC2020）论文集。[4] M. Boldrin 等，《MITICA 高压平台 1和套管的最终设计：ITER 加热中性束注入器原型》，《聚变工程与设计》123（2017）395–399。[5] M.Boldrin 等，《ITER 中性束注入器的高压平台1 和套管：MITICA 实验中的集成设计与安装》，《聚变工程与设计》146（2019）1895–1898。[6] M. Bigi 等，《SPIDER 实验离子源及其提取电源的设计、制造与工厂测试》，《聚变工程与设计》96–97（2015）405–410。[7] E. Gaio 等，《ITER中性束注入器离子源电源的替代设计概念》，《聚变工程与设计》83（2008）21–29。[8] https://ofilsystems.com/pro/luminar/[9] https://nlacoustics.com/[10] https://www.doble.com/product/pds100/[11] F. Bolognesi, E.Elli，G.Rizzi，L.Thione《一种用于六氟化硫绝缘装置快速瞬态测量的电容式探头装置》，4th ISH 雅典，1983年。[12] ~~G. Rizzi，G.Tronconi，R.Gobbo~~，G.Pesavento《鉴于 IEC 60 修订版确定冲击分压器的线性度：多种方法的比较》，9th ISH 横滨，1993年。[13] L. Zanotto，M. Boldrin，M. Dan，T. Patton，F. Santoro，V. Toigo，H. Tobari，A. Kojima，H.Decamps《确定MITICA 测试设施中击穿位置的策略：高电压测试活动结果》，即将刊出，本次会议。[14] M. Dan，M. Boldrin，V. Toigo，F. Santoro，L. Zanotto，H. Tobari，E. Oshita，H. Decamps《支持 MITICA 高电压系统保护的建模工作》，即将刊出，本次会议。[15] S. Hatakeyama，E. Oshita，M. Murayama，A. Kojima，H. Tobari、M. Kashiwagi、M. Dan、M. Boldrin、V. Toigo、F. Santoro、L.Zanotto、H. Decamps“ITER HNB高可靠性 1兆伏高压电源的研究”，即将发表，发表于本次会议。[16] A. Kojima、H.Tobari、T.Maejima、Y.Yamashita、E.Oshita、N. Shibata、M. Ichikawa、S. Hatakeyama、M. Murayama、M. Kashiwagi、M. Dan、M. Boldrin、V. Toigo、F. Santoro、L. Zanotto、Y.Tanaka、H. Decamps“ITER中性束注入 1兆伏高压电源研发进展”，即将发表，发表于本次会议。