SPIDER运行三年及MITICA首次集成测试的经验总结

D. Marcuzzi[a], V. Toigo[a], M. Boldrin[a], G. Chitarin[a,b], S. Dal Bello[a], L. Grando[a], A. Luchetta[a], R. Pasqualotto[a], M. Pavei[a], G. Serianni[a], L. Zanotto[a], R. Agnello[a,c], P. Agostinetti[a], M. Agostini[a], D. Aprile[a,d], M. Barbisan[a,c], M. Battistella[a], G. Berton[a], M. Bigi[a], M. Brombin[a], V. Candela[a], V. Candeloro[a], A. Canton[a], R. Casagrande[a], C. Cavallini[a], R. Cavazzana[a], L. Cordaro[a], N. Cruz[a,e], M. Dalla Palma[a], M. Dan[a], A. De Lorenzi[a], R. Delogu[a], M. De Muri[a], M. De Nardi[a], S. Denizeau[a], M. Fadone[a], F. Fellin[a], A. Ferro[a], E. Gaio[a], C. Gasparrini[a], F. Gnesotto[a], P. Jain[a], A. La Rosa[a], D. Lopez- Bruna[a,g], R. Lorenzini[a], A. Maistrello[a], G. Manduchi[a], S. Manfrin[a], N. Marconato[a], I. Mario[a,t], G. Martini[a], R. Milazzo[a], T. Patton[a], S. Peruzzo[a], N. Pilan[a], A. Pimazzoni[a,d], C. Poggi[a], N. Pomaro[a], B. Pouradier-Duteil[a,c], M. Recchia[a], A. Rigoni-Garola[a], D. Rizzetto[a], A. Rizzolo[a], F. Santoro[a], E. Sartori[a,b], B. Segalini[a], A. Shepherd[a,h], M. Siragusa[a], P. Sonato[a], A. Sottocornola[a], E. Spada[a], S. Spagnolo[a], M. Spolaore[a], C. Taliercio[a], P. Tinti[a], P. Tomsič[i], L. Trevisan[a], M. Ugoletti[a], M. Valente[a], M. Valisa[a], F. Veronese[a], M. Vignando[a], P. Zaccaria[a], R. Zagorski[a,l], B. Zaniol[a], M. Zaupa[a], M. Zuin[a], M. Cavenago[d], D. Boilson[m], C. Rotti[m], H. Decamps[m], F. Geli[m], A. Sharma[m], P. Veltri[m], J. Zacks[m], M. Simon[n], F. Paolucci[n], A. Garbuglia[n], D. Gutierrez[n], A. Masiello[n], G. Mico[n], C.Labate[n], P.Readman[n], E.Bragulat[n], L.Bailly-Maitre[n], G.Gomez[n], G.Kouzmenko[n], F.Albajar[n], M. Kashiwagi[o], H. Tobari[o], A. Kojima[o], M. Murayama[o], S. Hatakeyama[o], E. Oshita[o], T. Maejima[o], N. Shibata[o], Y. Yamashita[o], K. Watanabe[o], N.P. Singh[p], M.J. Singh[p], H. Dhola[p], U. Fantz[q], B. Heinemann[q], C. Wimmer[q], D. Wünderlich[q], K. Tsumori[s], G. Croci[t], G. Gorini[t], A. Muraro[u], M. Rebai[u], M. Tardocchi[u], L. Giacomelli[u], D. Rigamonti[u], F. Taccogna[u], D. Bruno[u], M. Rutigliano[u], S. Longo[u], S.Deambrosis[v], E.Miorin[v], F.Montagner[v], A. Tonti[w], F. Panin[z]

[a]*RFX*联合体，美国大道*4*号，*I–35127* 帕多瓦，意大利[b]帕多瓦大学，管理与工程系，圣尼古拉街*3*号，*36100* 维琴察，意大利[c]洛桑联邦理工学院 *(EPFL)* - 瑞士等离子体中心 *(SPC)*，*1015* 洛桑，瑞士[d]意大利国家核物理研究院莱尼亚罗国家实验室 *(LNL)*，大学大道*2*号，*I-35020* 莱尼亚罗（帕多瓦省），意大利[e]等离子体与核聚变研究所，高等技术学院，里斯本大学，*1049-001* 里斯本，葡萄牙[f]核研究与核能研究所，保加利亚科学院，沙皇大道*72*号，索非亚，*1784*，保加利亚[g]国家聚变实验室，能源、环境与技术研究中心，马德里，西班牙[h]英国原子能管理局卡勒姆聚变能源中心，卡勒姆科学中心，阿宾登，牛津郡，*OX14 3DB*，英国[i]卢布尔雅那大学，机械工程学院[l]国家核研究中心 *(NCBJ)*，*PL-05-400* 奥特沃克，波兰[m]*ITER*组织，维农-叙尔-韦尔东路，邮政专用信箱 *90 046*，*F-13067* 圣保罗莱迪朗斯，法国[n]聚变能源组织，转交 *Josep Pla 2*，*E-08019* 巴塞罗那，西班牙[o]日本量子科学技术研究开发机构 *(QST)*，茨城县那珂市向山*801-1*，邮编*311-0193*，日本[p]*ITER*印度，等离子体研究所，英迪拉桥附近，巴特村，甘地讷格尔，古吉拉特邦*382428*，印度[q]*IPP*，马克斯·普朗克等离子体物理研究所，*Boltzmannstraße 2*，*D-85748*，慕尼黑附近的加兴，德国[r]*LAPLACE*，图卢兹大学，法国国家科学研究中心，图卢兹，法国[s]日本国家聚变科学研究所，岐阜县土岐市下石町*322-6*，邮编*509-5292*，日本[t]*“G. Occhialini”*物理系，米兰比可卡大学，米兰，意大利[u]*ISTP-CNR*，等离子体科学与技术研究所，*Via Roberto Cozzi 53 - 20125* 米兰 *(MI)*[v]意大利国家研究委员会 *- CNR*，凝聚态化学与能源技术研究所 *(ICMATE)*，美国大道*4*号，*35127* 帕多瓦，意大利[w]INAIL-DIT，Via Ferruzzi, 40 - 00143 罗马[z]INAIL帕多瓦地方技术部门，Via Nancy, 2 - 35131 帕多瓦

ITER计划将两个加热中性束注入器及一个可选注入器作为辅助加热和电流驱动系统的一部分，以在其各运行阶段达到预期性能。每个注入器预计提供16.5 MW的中性束功率，这比全球现有设施的功率高出数个等级。为实现这一开发目标，RFX联合体建立了中性束测试设施（NBTF），利用名为SPIDER和MITICA的两个测试台之间的协同效应。SPIDER专用于开发和表征大型高效的

作者邮箱：*diego.marcuzzi@igi.cnr.it*

在ITER类条件下，以相关参数运行负离子源面临以下要求：源和加速器位于束流传播的同一真空环境中；能够抵御多个射频（RF）天线产生的电磁干扰；避免源外部发生射频诱发放电。SPIDER开展了三年的实验，针对实现满负荷性能所需的设计修改进行了研究。目前，源正处于一段较长的停机期，以吸收实验活动中的经验教训，特别是运行期间发生的事件和问题；这些情况促使团队识别出改进机会和必要措施（例如射频放电、局部烧蚀、漏水、其他损坏，以及为最大限度提高实现目标参数的可能性和裕度而进行的配置/设计升级）。

与此同时，ITER中性束注入的全尺寸原型MITICA正在推进中。该系统采用1 MV加速器并实现离子中和，相关工作包括制造束源、加速器和束线部件；已安装的电源和辅助装置则正在进行最终测试和调试。

对于这一在科研和工业领域均无先例的首创系统，1 MV电源的集成、调试和测试至关重要。高压元件的1.2 MV直流绝缘试验已成功完成。为确认1 MV输出而开展的集成测试，将逆变器系统、直流发电机和传输线组合起来，发现了部分组件存在的错误和故障。为实现可用于ITER的实际系统，相关问题已得到处理，并制定了系统修复和改进方案。

因此，鉴于现有注入器与ITER需求之间存在巨大差距，NBTF正成为一项必要设施，专门用于识别问题并寻找解决方案，以确保ITER中性束注入器运行能够按时成功实现。本文讨论了NBTF建设过程中汲取的经验教训以及未来展望。

关键词：ITER；NBTF；SPIDER；MITICA；中性束注入器

1. 引言

ITER中性束测试设施（NBTF）旨在开发ITER加热中性束注入器（HNB）的全尺寸原型，并对其进行测试，使其达到额定性能 [1,2,3]。

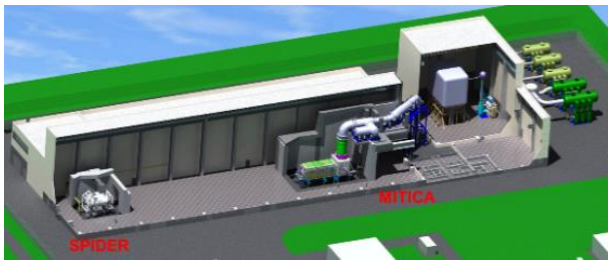


图1 – 中性束测试设施及SPIDER和MITICA实验

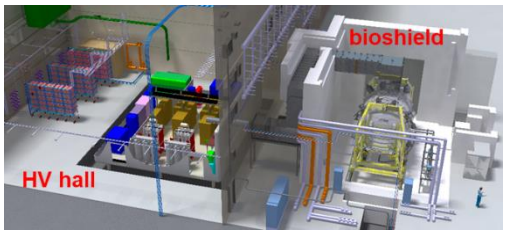
NBTF设立于帕多瓦（图1），其建设融入了一个国际责任与合作框架，参与方包括RFX联合体、ITER组织（IO）、聚变能源组织和JADA/QST，并有部分欧洲研究机构参与；该设施还与负责ITER诊断中性束（DNB）的印度测试设施（INTF）保持密切合作 [4]。

NBTF场址规划了两个测试台：SPIDER配备了ITER离子源的首个原型，与DNB配置高度相似；MITICA则是ITER HNB的1:1比例原型。

2021年，在运行三年后，SPIDER进入了长期停机阶段，旨在解决首次运行阶段出现并发现的问题。MITICA的注入器正处于建造的最后阶段，所有辅助系统均已安装，整个电源的最终集成测试也正在进行。

正在与全球其他专注于基于负离子的中性束的实验协同开展相关工作，尤其是日本和印度的实验，因为它们直接参与 ITER 和 NBTF；此外，欧洲在 EUROfusion 的支持下，也在推进具有挑战性的射频源开发。

2. SPIDER



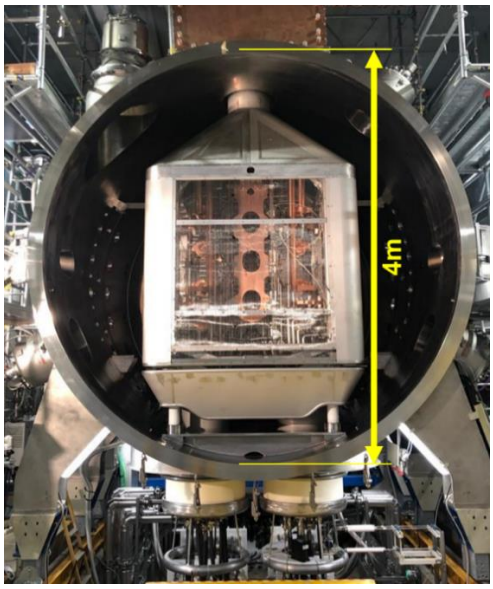


图 2 – SPIDER实验

SPIDER实验（图2），作为EUROfusion阶梯式方案中迈向ITER中性束注入器ITER源的第三步，与加兴IPP的BUG和ELISE一起，在负离子

作者电子邮箱：*diego.marcuzzi@igi.cnr.it*

源的诸多方面带来了新突破，而不仅仅是尺寸方面。在影响最大的因素中，值得强调的是，与其他现有中性束注入器不同，SPIDER（以及MITICA）的整个束源都位于真空室内，因此被同一种低压背景气体包围，束流在其中传播。这种配置是实现高压保持所必需的，尤其是ITER中的氚封存。

SPIDER测试平台自2018年起投入运行。SPIDER运行期间发生了多起事件，由此发现了一些早期问题，其中一部分在运行过程中得到解决或通过变通方式处理，其他问题则促使人们提出部件重新设计或改造的要求，并发现了改进机会。

2.1. 近期主要实验结果

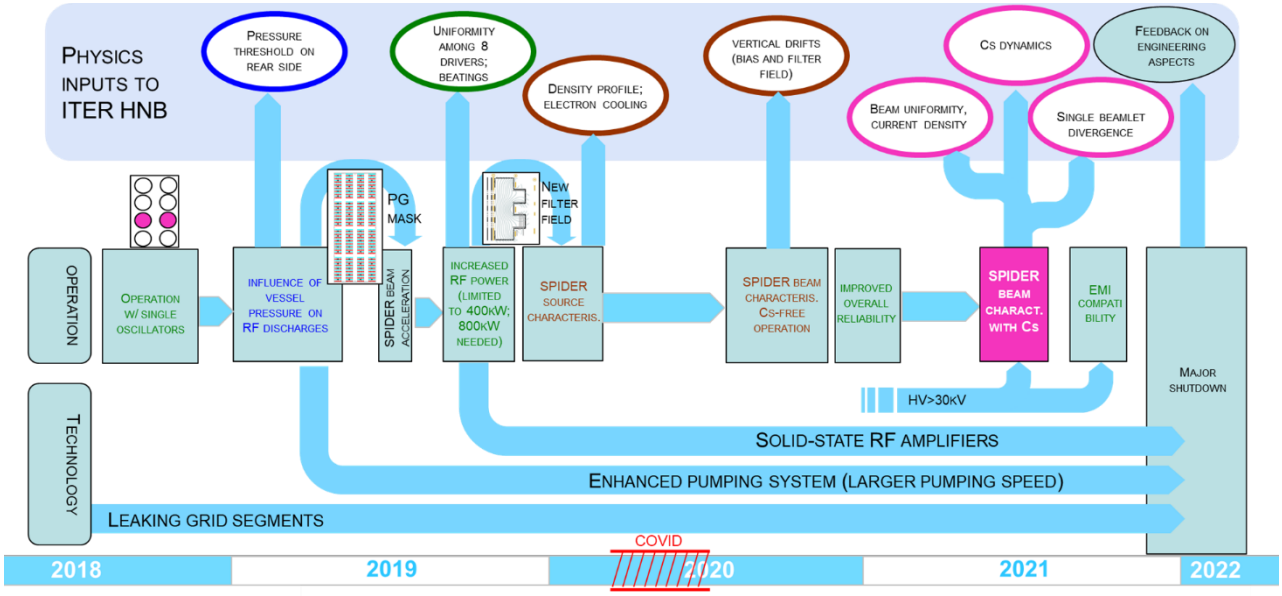


图3 – SPIDER实验活动概况

在最初三年中，SPIDER运行积累了大量实验信息，加深了人们对源性能的认识，并揭示了必须解决的运行问题，以便开展大规模束流运行，尤其是为MITICA运行做好准备。 总共开展了约250个实验日，最后一次铯实验活动持续了19天（其中2天处于D阶段）；总计执行了约4000个脉冲，脉冲总运行时间约为60小时。

图3总结了迄今为止的SPIDER实验活动，重点展示了主要事件、成果及其对停机的影响。

在最后一次未进行铯注入的实验活动中，系统的成熟度有所提升，使性能得以提高，尤其是加速电压；为避免实验阶段初期发生的射频放电[6]，临时在等离子体栅极（PG）上安装了一块掩板，仅允许抽取少量束束。

可以进行多次扫描，以表征高达 50 kV 时氢和氘中的束流光学，并采用不同的滤磁场设置以及源和偏置板的偏置电压设置，充分利用已部署的大量诊断系统。

随后，开展了首次采用铯注入的实验活动：正如预期，在等离子体栅极附近产生负离子的过程受益于铯蒸发进入源中（图4），与未使用铯时的运行情况相比，束let发散度有所降低。

研究发现，在射频功率、气体压力和偏置电压相同的条件下，负离子电流密度和共抽取电子电流取决于铯蒸发速率与等离子体开关占空比之比；H^-密度随时间的变化表明，磁过滤场对于维持等离子体栅极上的铯层至关重要等离子体作用所致。

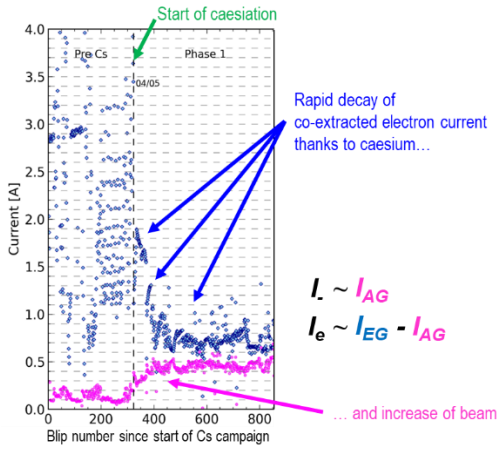


图4——首次铯化对电子电流和离子电流的直接影响。横轴为脉冲编号，纵轴为离子电流和电子电流，其中 IEG 和 IAG 分别为由引出栅极和加速栅极电源驱动的电流。

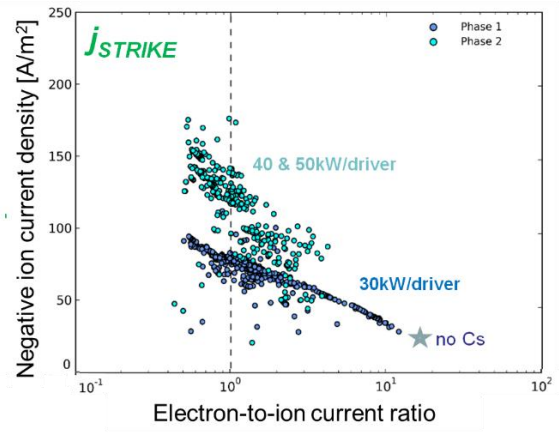


图 5 – 首个铯运行阶段（氢气中）的电子离子比和负离子电流密度，与无铯结果对比（SPIDER 要求 e/H⁻ 比值为 0.5，H 中的电流密度为 355 A/m² ）；负离子电流密度由仪器化量热计 STRIKE 测量 [7]。

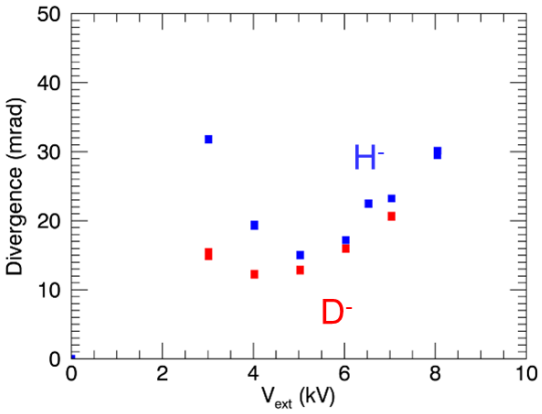


图 6 – 首个铯运行阶段的束let发散度，由束流发射光谱测量 [8]，典型精度为 < 10%（ITER 要求为 7 mrad）

共抽取电子与离子的比值已达到目标范围（图5），但研究发现，离子电流密度、束流均匀性和发散角（图6）仍需在未来的实验活动中进一步努力才能达到目标，这需要充分发挥射频发生器 [9] 的性能。

接下来的章节主要聚焦于根据实际发现和结果确定的 SPIDER 配置翻新、改进及后续行动，并进一步详述其工程设计方面的影响，而非讨论 HNB 的物理背景和预期功能前景；相关初步提示见 [10]。

2.2. 停机活动

SPIDER 停机始于 2021年底，先将源从容器中取出，随后进行全面拆解，并检查源各个部件的状态。



图 7 – SPIDER源的拆除

拆解后的检查中记录了许多有趣的细节，为停机活动提供了进一步的参考（图 8）。

在整个拆卸过程中，持续开展了机器和组件的初步分析，目前仍在进行：表面沉积物的化学分析；驱动器、离子源壁和栅极分段内嵌永磁体的磁场测量；液压连接处的氦泄漏测试；通过光学计量测量栅极的相对位置；等离子体面对表面状态的扫描与分析。

记录到部分部件出现明显劣化，目前正在进行仔细评估：离子源主腔室的整体表面状态（与等离子体相互作用的影响、漏水后的残留物、局部钼层磨损或脱落）、离子源背面因放电造成的侵蚀、驱动器后盖固定处和栅极分段接口处的部分氧化铝部件（衬套、垫圈、绝缘体）受损，以及底部四个驱动器受损 [11]。



图 8 – 离子源部件拆卸和检查示例（值得注意的是，PG 上的钼涂层下方露出了铜）

然而，此次停机的主要目标是实施计划中的重大改动：

- 已确定对配备射频驱动器的束源进行改造并优化布局、更改引出栅极，以及进行其他小幅升级；更换受损部件

在拆解过程中发现的问题已纳入规划；

- 用固态放大器替换射频振荡器；

- 升级抽气系统，以便源能够在压力高达 0.45 Pa、容器压力为 ≤ 40 mPa 的条件下运行，从而避免射频电场引发放电的风险，且不进行栅极遮蔽，因此所有束束均处于激活状态；

停机期间还将开展其他活动，包括维护，以及对电源和其他辅助系统进行小幅改进，并更新诊断系统[12,13,14,15]。

SPIDER预计将在停机结束时做好准备，向全面性能阶段迈进。

2.3. 源改造

图9列出了运行期间源部件出现的主要问题，以及停机期间计划采取的相应补救措施。

部件	主要问题	补救措施
SPIDER 射频驱动器 增强	局部高电场 大环路面积	设计修订（线圈匝数， 连接、部件形状及
SPIDER GG替换 分段采购	漏水	新分段
SPIDER EG改造	单个测量 分段电流	绝缘段 锥形孔
恢复PG滤波器 母排电气绝缘	对等离子体的损害 氧化铝等离子喷涂	采用固体材料的改进设计 绝缘垫片
针对熔毁的补救措施 驱动器孔周围的环	由于熔化的固定环 涡流	更换为独立 支架
射频驱动器 FSLW 采购	4 个受损的 FSLW	部分重新制造
钼涂层 翻新	一些磨损/损坏的 等离子体面对面	脱涂层和重新涂层 部件

图 9 – 迄今为止在 SPIDER源运行中发现的主要事件和限制汇总。 关于功能/物理方面可能存在的限制，进一步调查仍在进行中，因此本文不作详细讨论。

翻新和修改相关活动均按照独立项目进行规划和组织，以便更好地控制进度状态并跟踪采购工作：

- 射频驱动器改进：除了改进束源上的射频电路布局和连接外，还设计并实施了其他改动，例如为电容器和陶瓷绝缘件上的三重点加装静电屏蔽罩（见图10），以及在射频源背面采用了一种结构更简洁的新型偏置母排 [16]。

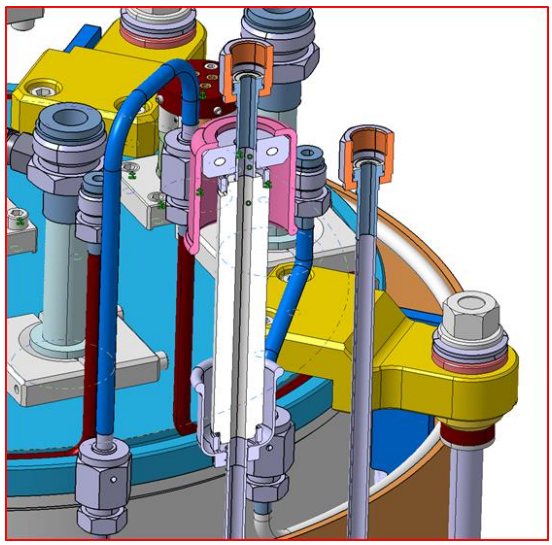


图10——修改示例：增加局部静电屏蔽罩（粉色部分）

- 改进射频电路布局，以降低不同驱动器对之间的互耦。研究发现，当两个或更多驱动器对同时供电时，互耦会导致等离子体发光出现调制 [17]

- 引出栅极（EG）修改：EG分段将进行修改，使其实现电绝缘。

彼此之间，以便区分各分段收集的电流与引出束流的电流，从而识别可能危及分段完整性的过度不均匀性；此外，将对EG孔径进行锥形加工，以增大安全裕度，避免束束撞击孔径边缘。见图11。

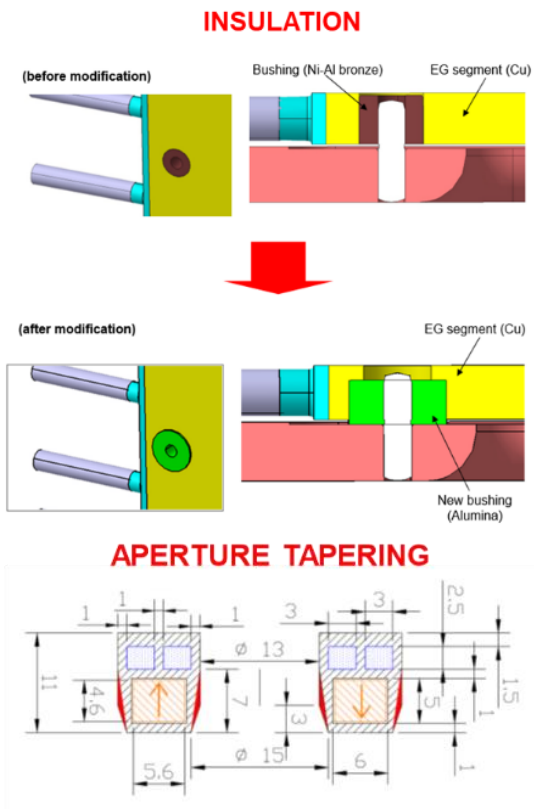


图 11 – 对EG分段的修改

- 等离子体栅极（PG）框架冷却增强：改造PG支撑法兰现有的冷却系统，以提高其效率，从而能够在等离子体栅极温度稳定在150°C时安全地稳态运行。

- PG滤波母排电气绝缘的恢复：对嵌入后驱动板（RDP）中的PG滤波电路母排进行改造，原先通过一层氧化铝涂层实现电气绝缘。新设计采用裸露母排（不再涂覆氧化铝），并使用聚醚醚酮元件确保母排与RDP表面保持距离，从而实现电气绝缘。

- 采购一个新的接地栅极段，以替换存在泄漏的接地栅极段

大多数 SPIDER源改造都与 MITICA/HNB 相关：其中一些此前已为人所知，并已在持续采购过程中整合到 MITICA 中；对于其他改造，则预计在实施转移前进行实验验证。

2.4. 射频电源发生器

射频系统的原始配置包括 4 台基于自由振荡四极管振荡器的发生器，采用推挽式自激科尔皮兹配置 [17,18] ，为离子源上的 4 对驱动器供电，用于电离气体并激发等离子体。离子源背面安装了四个常规 L型匹配网络，用于将驱动器对的阻抗调节至与射频发生器的阻抗相匹配 [19]。借助该匹配网络，负载阻抗（即射频传输线与离子源的阻抗）仅在一个狭窄的频率范围内等于振荡器的输出阻抗，这就是所谓的匹配条件。实现匹配条件至关重要，这样才能在不使整个射频系统承受过大压力的情况下向负载输送功率；实现方法是改变发生器的工作频率。

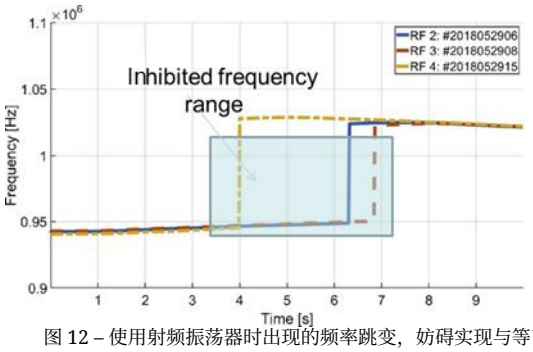


图 12 – 使用射频振荡器时出现的频率跳变，妨碍实现与等离子体阻抗的最佳匹配条件

然而，自 SPIDER 实验开始以来，射频振荡器的运行一直受到一些重要限制。首先，出现了所谓的“频率跳变”[20], ，这是一种振荡器在谐振负载上运行时固有的频率不稳定性（图 12），会阻碍达到匹配条件 [21]。尽管在 SPIDER 中，这种现象的发生机制已得到理解并建立了模型，但频率跳变仍不可避免并且会严重限制输送给源的功率[22]。

除了频率跳变问题外，振荡器中存在相对较高的电压，因此必须对高压真空电容器进行调理，以避免运行期间发生内部放电；调理过程可能耗时较长，从而降低系统的可用性。高电压也意味着通常需要维护最关键的组件。

上述证据促使人们决定更换 SPIDER 和 MITICA 中的射频发生器，并将 ITER 当前的基线方案从自激式自由运行四极管振荡器技术改为固态放大器技术 [17,23,24]。人们认为，固态放大器技术对离子源运行具有很强的吸引力，因为预计不会出现频率跳变现象，也无需使用需要高电压的四极管。事实上，IPP（加兴）已对采用正反馈的固态发生器进行了测试 [25,26]。

2.5. 真空系统改进

从实验活动的初始阶段起，增强 SPIDER 真空抽气能力的必要性就已显现，这主要是由多种因素造成的：测得的束源电导高于设计值；在容器压力较高（高于 40mPa）时，束源背面出现射频诱发击穿；以及提高源中的最大工作压力（≥0.4Pa）有助于负离子产生。

这些彼此关联的因素都要求安装一套额外的抽气系统，与现有系统并行运行。

初步评估对比了几种增加抽气能力的可行方案，包括商用低温泵、定制低温板或非蒸散型吸气剂（NEG）泵。

最终选定的方案是 NEG 泵系统（见图 13），该系统采用 SAES Getters 公司开发的 ZAO®合金非蒸散型吸气剂盒式组件，[27,28], 主要是因为合适的商用低温泵系统体积过于庞大，而定制低温板则需要昂贵的专用低温系统，且会导致集成工作非常复杂。

盒式组件是 NEG 的基本单元，由按堆叠方式排列的圆盘组成。吸气剂盒按规则排列在板上，以便安装在 SPIDER容器内。采用包含 384 个吸气剂盒的基准配置时，抽速为 S=215-240 m^3/s；吸气剂盒数量可增加至 512 个，使抽速达到 S=260-280 m^3/s；氢/氘的容量为 240000/170000 $Pa*m^3$ ，再生时间少于 12 小时。

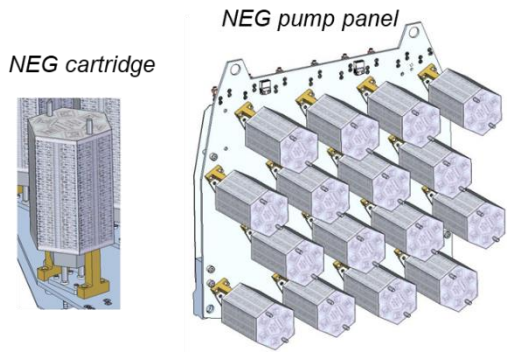


图 13 – NEG泵基本元件：盒式组件和面板

该系统还配备了用于加热 NEG元件以进行活化和再生的电源，以及运行泵所需的本地控制单元。

需要增设一个圆柱形扇区，以扩展现有的SPIDER容器并容纳 NEG 系统；此外，还应安装热静电屏蔽罩，发挥双重作用：保护 NEG泵免受束源上发生的放电影响，并在再生期间保护 NEG泵周围的所有组件免受热辐射影响，因为吸气剂盒再生需要高温。如图14 [29]所示，所有这些新增元件都将由专用水回路主动冷却。

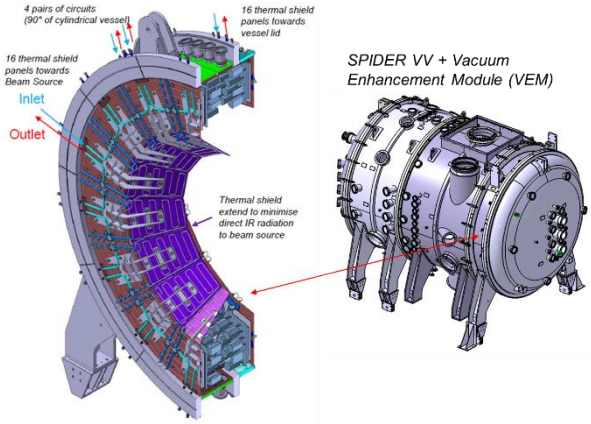


图 14 – 带有 NEG面板和主动冷却热屏蔽罩的附加容器模块

MITICA 不受此问题/改进的影响，因为其真空由大型低温板提供。

2.6. 其他子系统

事实上，还有一些子系统在集成后短期内就表现出相当高的效能，以下举两个例子。

铯炉系统对于将铯注入源内以提高负离子产生率是必不可少的。这是一套涉及多个学科、分布范围较广的系统，包括HVD内用于安置电源、诊断机柜和PLC外围设备（输入/输出模块）的柜体；这些设备通过传输线连接到安装在源上的炉，而炉处于真空环境并处于束源电位。仪表与控制室内的另一个柜体则容纳本地控制面板、PLC中央处理器以及与CODAS和联锁系统的连接，如图15所示。在SPIDER投入运行前，铯炉原型和3台最终炉已在NBTF的CATS（铯测试台）设施上完成测试和表征[30,31]。成功完成安装和调试，并证明其与电磁干扰和噪声兼容且具有良好的抗扰性后，每台炉都已准备就绪，炉内装有10g金属铯。整个实验活动期间，已成功进行了不同流率（每台炉6–20 mg/h）的铯蒸发，其对共抽取电子和负离子产生的影响已在[6,11]中展示。铯流率通过直接安装在注入喷嘴上的表面电离探测器（SID）持续测量。最后，在实验活动结束时进行炉检查，发现储液罐中的铯受到污染。这可能是由于后来发生的大量漏水，导致水蒸气与剩余的铯及杂质发生反应，从而破坏了炉阀门的密封性。因此，无法通过直接称量储液罐中的残留铯来推算实验活动期间蒸发的铯总量，只能根据SID数据进行估算。正如[11]所示，SID测量足够准确；具体而言，测量结果表明，3台炉共蒸发了2.4g铯。此次首次铯实验活动无法提供足够可靠的外推结果，以稳健评估ITER HNB的铯消耗量；不过，目前获得的数据证实了炉总容量（3*40=120g）的设计合理。

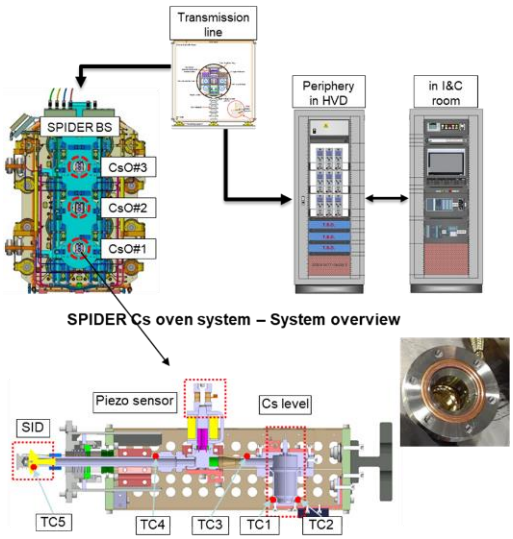


图15 – SPIDER铯炉

针对SPIDER源和束流、具备互补能力的一整套诊断系统，对于表征其性能并找出尚未解决的问题至关重要。目前使用的束流诊断设备如图16 [32,33,34,35,36,37,38]所示：具有高空间分辨率的STRIKE非冷却量热计可测量单个束束的强度分布；可见光层析成像和束流发射光谱分别可在不拦截束流的情况下测定束束强度和发散角；单个束束的电流监测器还可测量束流强度的高频分量，而Allison扫描仪

可测量特定束束的完整发射度。后两种系统并非初始配置的一部分，而是在实验阶段开发并安装的，旨在验证并扩展其他系统的能力。本次停机期间还将引入其他诊断设备，主要用于更深入地研究等离子体源的不均匀性，包括束束组内部的局部不均匀性以及整个源范围内的整体不均匀性 [39,40,41,42]。其中，计划使用可插入探针测量沿驱动轴直至栅极处以及平行于等离子体栅极方向的等离子体参数；使用阻滞场能量分析仪测量等离子体栅极处正离子的能量分布；在热电偶受到电磁噪声严重影响的位置，将以光纤布拉格光栅传感器取而代之。

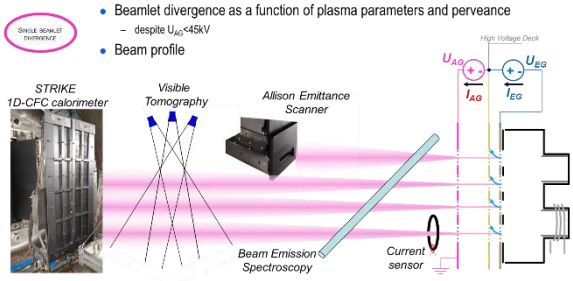


图16–单束流特性表征

3. MITICA

MITICA是ITER HNB的一比一原型，正逐步接近开始运行的阶段。

在此之前，为完成整个实验装置组装、测试和调试，目前正在开展三大领域的工作：

- 最后仍在完成中的组件/装置 [43] - 电源集成最终试验及专项调试 - 为真空中的高压耐受试验专项实验活动做准备



Fig. 图17–MITICA注入器容器当前状态

3.1. 正在进行的采购

虽然电源系统的现场安装已于数年前完成，以便开展必要的长期测试，但其他部件和辅助设备仍在采购或安装中：

- 容器安装后，容器内机械部件的采购仍在进行中，例如束源、 [44], 束线部件和低温泵；
- 辅助装置的采购即将完成（由 F4E 采购），例如低温装置
- 最后一批一对一“单装置”/CODAS 集成调试正在进行，或预计很快启动

3.2. 集成电源测试

MITICA 电源是一个极其复杂的系统，超出了传统工业技术的能力范围 [45]。它是全球首个以 1MVdc 电压等级和如此功率额定值开发的原型。MITICA 的一项主要任务是开发、测试并精细调校这一电气系统。

该系统由欧洲和日本团队在 ITER组织协调下设计，以国际规范与标准、JT60（那珂－日本）的既有经验以及额外的专项研发为基础。电源的高压元件由 JADA 和 F4E 采购。各团队分别提供了各自负责的部分，包括现场安装和独立的现场验收测试。

然而，在最终运行阶段，各个部件高度集成，因此需要深入协调接口，并采用集成调试流程；这在技术层面和责任划分方面都极为复杂。

在成功完成低功率绝缘和功能测试后，2021年在1MV高功率集成测试期间发生了故障，电压击穿损坏了电源系统的两个组件 [46,47,48,49]:

- 800kV–1MV级整流二极管桥的一个支路（1 MVdc是由五个200 kVdc级串联连接而成的）
- 为离子源供电的 1 MV 绝缘变压器的高压套管。

在出现故障之前，MITICA 电源的集成测试已达到 700 kVdc，并通过了 1000 秒测试。

开展了检查，并利用快速暂态模型进行了数值分析，以确定这些意外事件的根本原因。这些事件与如此高的电压等级有关，由于缺乏经验，在设计阶段极难评估。分析阐明了电压击穿导致故障的动态过程，并找出了提高系统可靠性和可用性的解决方案。这些方案将在恢复阶段于 MITICA 中实施。此外，还获得了对改进 ITER 电源设计非常有用的信息，从而引发了一项.....

审查现有项目，以纳入额外的保护措施。

然而，目前尚未找到能够明确确定 BD 具体位置的证据。

因此，目前由 QST、中性束测试设施团队和 ITER 共同开展的整体工作正沿着两条平行路线推进：

- 开展低功率绝缘测试活动，以确定电压击穿的确切位置并提高系统绝缘的密封性，同时利用在高压实验室专家支持下开发的额外诊断与监测系统；

- 制定二极管桥和 1 MV绝缘变压器的修复与改进计划，并引入额外的保护系统。

作为经验教训，对两次故障的解释是通过快速暂态模型得出的。该模型考虑了在极快速动态过程（频率约为 MHz）下占主导地位的寄生参数 C 和 L；这些参数取决于组件的实际几何结构，而该结构事先无法确定，因为它取决于供应商制定的项目方案，属于其专有技术。我们不能忘记，这是全球独一无二的 1 MV直流系统，此前没有任何运行经验可供参考。

参考方案基于J60SA的过往经验：世界上能量最高的500 kV负极性中性束注入系统已运行数年，期间电力系统未出现任何问题。此外，电力系统的各个部件均按照国际标准进行设计和测试，并采用了与500 kV系统[48]相似的适当安全裕度。

3.3. 真空中的高压测试准备工作

ITER注入器开发中的一个关键点是在容器内实现1 MV直流耐压。

计划在安装容器内组件之前，对MITICA实验开展高压测试活动，以深入了解MITICA试验台需要研究的主要课题之一。

这些测试的主要目标是：

- 在安装束源之前，确保MITICA在真空和低压气体环境下可耐受高达-1 MV的电压；

- 建立并验证适用于大间隙和多电极的耐压缩放定律（这是有效开展设计优化的必要条件）。

为应对静电屏蔽罩（见图18）的设计、采购和安装，启动了一项项目。该屏蔽罩仿照束源表面制作，以便在实际源 [50,51]交付前及时开展预先测试。

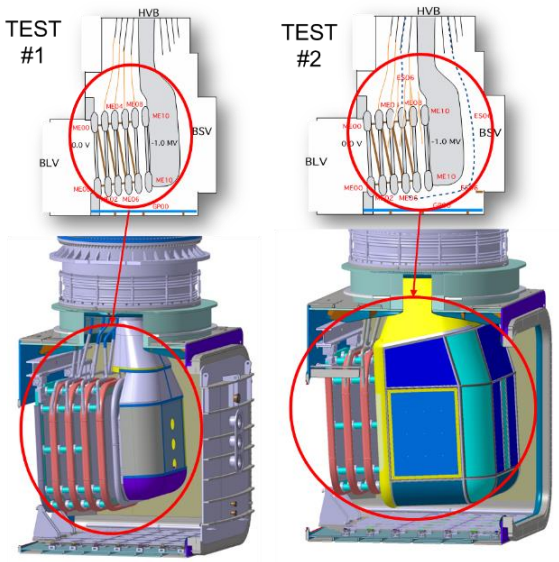


图 18 – 真空高压测试配置（标示出源模型）

在 QST 开展的实验表明，为提高电压为 -1 MV 的离子源与接地容器之间的耐压，很可能至少需要一个处于中间电压的中间屏蔽罩。为此，设计了一个将安装在 -600 kV 级上的中间静电屏蔽罩，以便在模型上进行测试；如果确认确有必要，也可重复用于实际束源。该设计既考虑了静电方面的要求，也考虑了需要对源后部外侧周围空间进行抽气这一相互冲突的要求，因此采用了带有交错孔阵列的双层结构（见图 19）。

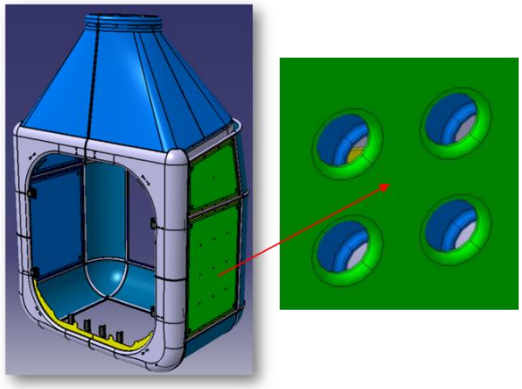


图 19 – 中间静电屏蔽罩的设计

此外，为进行耐压测试，已确定并增设辅助设备：真空抽气系统监控摄像机，以及电气测量和专用控制系统的集成。

4. 结论

SPIDER即将进入首次长期停机，此前已完成三年的实验。在性能有所降低的情况下，仍取得了有意义的结果，同时也确定了必要的改造项目，主要包括源升级、射频发生器更换以及真空抽气系统的改进，以便

在下一运行阶段实现目标性能。

MITICA正逐步完成首次实验活动启动前的各项准备工作。在电源系统的最终集成测试期间，发生了数次电压击穿。得益于专门开发的新模型，MITICA正在实施补救措施和额外的保护系统，同时也在ITER中性束注入器的设计中纳入这些措施。

这些电压击穿事件表明，目前关于1兆伏直流供电系统的经验和数据不足。MITICA的作用日益凸显：在ITER运行前弥补这一空白。

在完成MITICA容器内组件的采购工作的同时，正在为开展真空高压测试做准备，以便在首次实验活动前评估耐压能力。

总体而言，SPIDER和MITICA相关经验中最积极的一点是，该设施充分发挥了自身作用，揭示了项目中的关键问题，并使人们能够在系统部署到ITER之前采取措施。

中性束测试设施团队与ITER组织之间已开展的密切合作，使得在ITER中性束系统的实施过程中能够考虑SPIDER和MITICA确定的解决方案。

致谢与免责声明

本研究是在 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。

本研究也在 EUROfusion联盟框架内开展，并通过欧盟原子能共同体研究与培训计划（资助协议编号：101052200 — EUROfusion）获得资助。

不过，文中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立场。欧盟和欧盟委员会均不对此承担责任。这些观点和意见也不一定反映 ITER组织的立场。

参考文献

[1] 87 2012 1805 1815 L.R. Grisham 等，《聚
[2] 19 2017
变工程与设计》（）- V. Toigo 等，《新物理学杂志》（）
085004 V. Toigo 等，《聚变工程与设计》
[3] 168 2021
（） 112622 M.J. Singh 等，印度 I
[4]
TER诊断中性束表征测试设施的研发状况，《核聚变》59（2019）096034[5] D. Wünderlich 等，ITER负离子中性束注入：测试设施 BATMAN升级版和 ELISE 中氘长脉冲运行的现状，《核聚变》 61 2021 096023 （）E. Sartori 等，
[6]
等离子体栅极遮蔽对 SPIDER早期运行结果的影响，发表于本届 SOFT大会的论文集[7] A. Pimazzoni 等，通过诊断量热法和热成像评估 SPIDER束流特性，《科学仪器评论》91（ 2020 033301 ）M. Barbisan 等，SPIDER负离子源中束流发
[8]
射光谱的初步结果，《等离子体物理、控制与聚变》63
(2021 125009) N. Marconato 等，《SPIDER实验中用于改
[9]
善等离子体约束的新磁体组集成》，本届SOFT大会论文集 [10] E. Sartori 等，《负离子源SPIDER首次使用铯运行》，《核聚变》62 (2022) 086022, https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac715e [11] C. Gasparrini 等，《运行3.5年后的SPIDER源现状》，本届SOFT大会论文集 A. Luchetta 等，《ITER全尺寸束源SPIDER在中性束测试设施中的控制系统竣工设计——关键评述》，本届SOFT大会论文集 [12] G. Manduchi 等，《面向长期实验的CODAS：SPIDER的经验》，本届SOFT大会论文集 [13] G. Serianni 等，《SPIDER实时数据可视化工具》，本届SOFT大会论文集 [14] L. Grando 等，《SPIDER和NBTF中央安全系统的竣工设计、调试与集成》，本届SOFT大会论文集 [15] M. Bigi 等，《运行四年后SPIDER离子源和引出电源设计的更新》，本届SOFT大会论文集 [16] M. Recchia 等，《SPIDER束源电气设计的改进》，本届SOFT大会论文集 [17] A. Maistrello 等，《SPIDER实验活动中遇到的电气问题概述》，本届SOFT大会论文集 [18] R. Zagorski 等，《SPIDER装置驱动器中感应射频加热的二维模拟》，本届SOFT大会论文集 [19] A. Zamengo 等，《射频电路的电气与热分析》，《聚变工程与设计》，第84卷，第2025页–2030, 2009
[20] M. J. Singh 等，《印度负离子设施中射频等离子体源
的调试》，《AIP会议论文集》，第1390卷，第1期，第
604 613, 2011 - F. Gasparini 等，《SPIDER射频振荡器稳定
[21]
运行区域的研究》，《聚变工程与设计》，第146卷，第
2172 2175, 2019 - A. Zamengo 等，《大型负离子源电源系统：
[22]
SPIDER实验的早期运行经验》，《聚变工程与设计》，第
173， 112790, 2021 页 R.
[23]
Casagrande 等，《NBTF实验和ITER HNB大功率离子源用固态射频发生器的设计》，本届SOFT大会论文集 [24] M. De Nardi 等，《ITER HNB和NBTF实验用固态射频放大器原型的专项测试》，本届SOFT大会论文集 [25] W. Kraus 等，《中性束注入系统大功率射频离子源用固态发生器》，《聚变工程与设计》，第
91， 16 20, 2015 页– U. Fantz 等，《聚变用负
[26]
氢离子源：从等离子体产生到束流特性》，《物理学前沿》
9 709651, 2021 ：
[27]

F. Siviero 等，《用于聚变应用的ZAO®烧结吸气剂材料表征》，《聚变工程与设计》，第 146， 1729 1732, 2019 页 - F. Siviero
[28]
等，《用于聚变应用的ZAO基非蒸散型吸气剂泵解决方案的稳健性》，《聚变工程与设计》，第
166, C.
112306, 2021
[29]
Cavallini 等，《真空增强模块冷却回路的研究、设计与热工水力模拟》，本届SOFT大会论文集 [30] M. De Muri 等，《SPIDER铯炉的功能测试》，，《聚变工程与设计》(2021年) [31] A. Rizzolo 等，《在铯测试台上对ITER HNB负离子源用SPIDER铯炉原型进行表征》，《聚变工程与设计》(2019) [32] M. Barbisan 等，《SPIDER负离子源中铯和H^-/D^-密度的表征》，本届SOFT大会论文集 [33] B. Duteil 等，《首次使用束流电流监测器表征SPIDER束流交流分量》，本届SOFT大会论文集 [34] R. Delogu 等，《利用机器学习技术表征STRIKE束流：在实验数据上的应用》，本届SOFT大会论文集 [35] I. Mario 等，《基于铯注入时SPIDER处闪烁体阵列测得的中子开展束流均匀性研究》，本届SOFT大会论文集 [36] R. Agnello 等，《负离子中的剥离损失测量

源SPIDER》，本届SOFT大会论文集 [37] A. Shepherd 等，《使用束流束电流直接测量表征SPIDER含铯运行时的束流均匀性》，本届SOFT大会论文集 [38] O. McCormack 等，《用于SPIDER聚变中子能谱测量的EJ276和EJ309闪烁体的通量对称性与运行比较》，本届SOFT大会论文集 [39] R. Pasqualotto 等，《SPIDER诊断系统的改进》，本届SOFT大会论文集 [40] M. Ugoletti 等，《SPIDER负离子束层析重建技术的开发》，本届SOFT大会论文集 [41] V. Candeloro 等，《用于研究大型负离子源等离子体特性的可移动静电诊断装置设计》，本届SOFT大会论文集 [42] M. Brombin 等，《用于SPIDER接地栅极传感器的定制热电偶输入模块》，本届SOFT大会论文集 [43] M. Battistella 等，《ITER中性束测试设施中MITICA安全系统的功能安全评估流程》，本届SOFT大会论文集 [44] R. Moron 等，《MITICA实验的束源：采用的策略、主要组件的制造设计、工程设计与制造》，本届SOFT大会论文集 [45] L. Zanotto、A. Ferro 和 V. Toigo，《聚变工程与设计》84 (2009) 2037-2041[46] M. Boldrin 等，《MITICA实验（ITER加热中性束注入器原型）中1 MV电源的局部放电检测》，本届SOFT大会论文集 [47] L. Zanotto 等，《在MITICA测试设施中确定击穿位置的策略：高压测试活动结果》，本届SOFT大会论文集 [48] M. Dan 等，《支持MITICA高压系统保护的建模工作》，本届SOFT大会论文集 [49] M. Kashiwagi 等，《ITER中性束注入用1 MV高压电源的研发进展》，本届SOFT大会论文集 [50] D. Aprile 等，《MITICA高压测试用电极设计》，本届SOFT大会论文集 [51] T. Patton 等，《MITICA高压测试的电气诊断》，《MITICA高压测试的电气诊断》，本届SOFT大会论文集