

PRIMEROS PASOS EN EL EMPLAZAMIENTO DE IFMIF-DONES

MOISÉS WEBER

IFMIF-DONES España / CIEMAT

JOSÉ AGUILAR

Universidad de Granada

SANTIAGO BECERRIL

Universidad de Granada

BEATRIZ BRAÑAS

CIEMAT

JAVIER DÍAZ

Universidad de Granada

ÁNGELA GARCÍA

CIEMAT

BELIT GARCINUÑO

CIEMAT

JESÚS A. GARRIDO

Universidad de Granada

JAVIER GUTIÉRREZ DEL OLMO

Empresarios Agrupados Internacional

MARÍA LUQUE

Universidad de Granada

CRISTINA DE LA MORENA

CIEMAT

ANTONIO MORENO

Universidad de Granada

LEONARDO NANÍA

Universidad de Granada

DAVID REGIDOR

CIEMAT

DANIEL SÁNCHEZ

Universidad de Granada

CLAUDIO TORREGROSA

Universidad de Granada

J. ANTONIO CARRILLO

Universidad de Granada

ÁNGEL IBARRA

IFMIF-DONES España / CIEMAT

INTRODUCCIÓN

La energía de fusión ha sido uno de los mayores retos científicos de la humanidad desde los años 50 del siglo pasado. Se trata de una fuente de energía segura, sostenible y masiva, basada en un combustible inagotable y distribuido en todo el planeta, que podría completar el mix energético en la segunda mitad de este siglo. Este objetivo se materializará en el futuro demostrador europeo de planta de producción eléctrica, DEMO (DEMOstration power plant). Esta planta confirmará, la viabilidad tecnológica y económica de la energía de fusión, con una operación continuada y la inyección de energía en la red eléctrica. Para ello, DEMO necesita alimentarse de todo el *know-how* adquirido en ITER y el Programa de Fusión, pero también necesita que se ensayen los materiales más críticos de su estructura interna.

Así, ITER vendrá a responder definitivamente a la pregunta de “cómo” debe ser construido y operado DEMO, pero, dado que ITER no operará bajo un ciclo de trabajo tan intensivo, ni a tanta potencia, ITER no responderá a la pregunta de “con qué” materiales deben ser construidos los elementos críticos, para garantizar su durabilidad y un bajo nivel de activación a lo largo de la vida útil de la planta [1].

En la actualidad, no existe ningún banco de pruebas, capaz de reproducir las condiciones de daño que se producirán en los materiales más expuestos de DEMO y las futuras plantas de fusión.

IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility-DEMO Oriented NEutron Source) [2] es la infraestructura científica que viene a responder a esta necesidad. En IFMIF-DONES, un acelerador de partículas producirá un haz

de deuterones (D^+) de 125 mA de corriente y 40 MeV de energía, que impactará sobre una cortina de litio líquido de 25 mm de espesor fluyendo a 15 m/s. Las reacciones producidas en el blanco de litio, al incidir el haz de deuterones, generarán un flujo de neutrones de alta energía y con suficiente intensidad como para simular, de forma acelerada, el daño que producirían los neutrones en un reactor de fusión. Ese flujo de neutrones se usará para irradiar muestras de materiales ubicadas inmediatamente detrás de la cortina de litio, en los módulos de prueba de la zona de irradiación (Figura 1).

Como parte de las actividades de apoyo al inicio de la construcción de esta infraestructura, incluida desde 2018 en el roadmap del European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI), se han puesto en marcha varios progra-

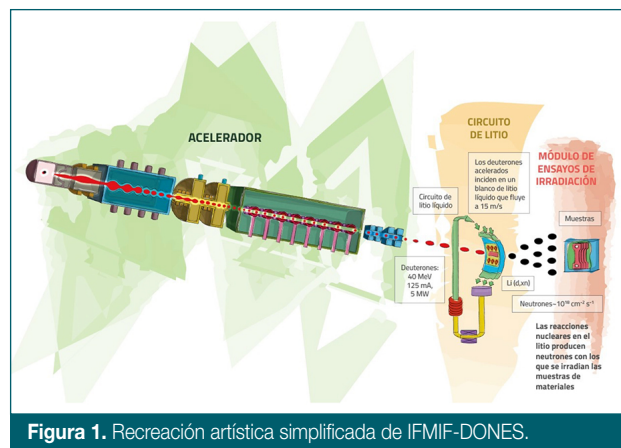


Figura 1. Recreación artística simplificada de IFMIF-DONES.

mas para avanzar en las actividades de apoyo al proyecto, incluyendo la construcción de sus primeros edificios y laboratorios.

Entre los programas con actuaciones directas en el emplazamiento, destacan DONES-PRIME, gestionado por CIE-MAT y el Ministerio de Ciencia e Innovación y DONES-UGR, gestionado por la Universidad de Granada y la Junta de Andalucía, ambos cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Por otra parte, en junio de 2021, mediante un convenio de colaboración entre la Administración General del Estado y la Junta de Andalucía, se constituyó IFMIF-DONES España, el consorcio para el impulso de la construcción en España de la infraestructura científico-técnica IFMIF-DONES, cuya finalidad es gestionar y promover la colaboración científica, económica, técnica y administrativa de las entidades que lo integran y ostentar la titularidad de la infraestructura.

Este artículo sintetiza el conjunto de actividades que se están desarrollando en este contexto y se completarán durante 2022-2023.

EL EMPLAZAMIENTO

IFMIF-DONES se ubicará a 17 km al suroeste de Granada, en el Parque Metropolitano Industrial y Tecnológico de Escúzar.

Como requisito para el diseño de los edificios y el futuro licenciamiento de las instalaciones se han acometido estudios topográficos, geotécnicos y geofísicos, sísmicos, meteorológicos e hidrológicos entre los que se incluye una campaña geotécnica intensiva con 42 sondeos, 9 calicatas y múltiples ensayos, cuyos resultados garantizan la suficiente información para el correcto diseño de las cimentaciones.

Por otra parte, la región del municipio de Escúzar es considerada como una zona de sismicidad moderada, con predominio de fallas "lentas". Entre ellas se encuentra la Falla Sur de Escúzar, a 4 km del emplazamiento, con orientación este-oeste. Por su cercanía, esta falla poco estudiada es de especial interés, así que aprovechando los datos recogidos durante la serie sísmica de Santa Fe-2021, se ha programado un nuevo estudio pormenorizado de peligrosidad sísmica, que incluye una campaña de medidas en campo y la instalación permanente de equipos de medida, en el emplazamiento.



Figura 2. Recreación artística de la planta de IFMIF-DONES.

Finalmente, se está construyendo, en varias fases, la Estación Medioambiental Experimental METEO-DONES cuyo núcleo es una estación meteorológica con una serie de sensores y un sistema de procesado y difusión de los resultados, que ya ha empezado a recopilar un histórico de observaciones in-situ. Éste será de vital importancia para el licenciamiento y operación de IFMIF-DONES y también servirá a otras iniciativas relacionadas con la meteorología y el clima.

SOPORTE DE INGENIERÍA

Como parte del trabajo llevado a cabo por la Oficina Técnica establecida en Granada, se han puesto en marcha una serie de actividades cuyo objetivo es desarrollar aspectos clave de la ingeniería y el diseño de IFMIF-DONES. Esta Oficina también trabaja en la planificación de la construcción, promoviendo estudios de interés como la revisión crítica del plan de construcción o el pre-diseño de sistemas de apoyo a la integración de proyecto.

LOS PRIMEROS EDIFICIOS

IFMIF-DONES ocupará un espacio de más de diez hectáreas (Figura 2). En 2022 está previsto el inicio de la construcción de cuatro edificios. Tres de ellos, pertenecen a la propia instalación y el cuarto, será un centro de investigación anexo, que dará soporte a la misma.

El edificio de Administración y Visitas de casi 5000 m² útiles está destinado a oficinas, salas de reuniones y espacios polivalentes para albergar actividades dirigidas a los visitantes, incluyendo un mirador desde el que poder observar la infraestructura. El edificio de Control de Accesos gestionará el acceso de peatones y vehículos mientras que el Almacén estará compuesto por dos volúmenes siendo, el mayor, una nave de 800 m² y 12 metros de altura. También se desarrollará la urbanización colindante a los edificios, tal como se muestra en la infografía de la Figura 3.

El cuarto edificio será el Centro de Investigación IFMIF-DONES-UGR, situado frente al acceso principal de IFMIF-DONES. Este centro albergará actividades de investigación y desarrollo tecnológico e industrial en torno al diseño, construcción y operación de IFMIF-DONES. Se trata de un edificio versátil que se adaptará a cada fase del ciclo de vida de la infraestructura.



Figura 3. Infografía de la zona de actuación de DONES-PRIME.

LOS PRIMEROS LABORATORIOS Y EXPERIMENTOS DE VALIDACIÓN

Hace más de 15 años que se vienen desarrollando y validando tecnologías necesarias para IFMIF-DONES. Sin embargo, aún persisten algunos desafíos tecnológicos que requieren un esfuerzo adicional de desarrollo y validación, como la mejora de la disponibilidad y eficiencia de los sistemas de potencia de radiofrecuencia (RF) y su capacidad para mitigar las inestabilidades en las cavidades aceleradoras, la gestión de la interfaz del haz de partículas con el litio en un entorno de ultra alto vacío, el control de impurezas en el litio, la selección de los sensores que servirán para caracterizar los niveles de irradiación en la zona donde se situarán las muestras, la optimización del mantenimiento y manipulación remota y el entrenamiento temprano de operadores y técnicos, que permitan operar la planta lo antes posible. Con el fin de avanzar hacia soluciones confiables, desde los programas DONES-PRIME y DONES-UGR, y con el apoyo de IFMIF-DONES España, se están implementando los siguientes laboratorios y experimentos de validación que se ubicarán en el emplazamiento de IFMIF-DONES.

El circuito experimental de litio líquido LITEC

El circuito principal de litio de IFMIF-DONES será el mayor circuito de litio líquido del mundo, con cerca de 10 m³ de litio a unos 300°C y un caudal de unos 100 l/s. Durante la operación de IFMIF-DONES, se generarán distintas impurezas en el litio, que es necesario controlar y extraer, no sólo para asegurar la integridad del circuito y su correcta operación, sino también por seguridad radiológica. Para conseguirlo, se derivará continuamente parte del caudal del circuito principal hacia un Sistema de Control de Impurezas, donde se instalarán trampas y medidores de impurezas [3].

Aunque se ha investigado mucho sobre el control de impurezas del circuito de litio en IFMIF e IFMIF-DONES, [4,5,6], las tecnologías previstas aún deben validarse para las extraordinarias condiciones de operación de esta infraestructura. El circuito experimental de litio líquido LITEC, con un inventario de litio de unos 700 litros y tamaño y condiciones de operación representativos para IFMIF-DONES, permitirá ensayar y validar distintas tecnologías de medida y de filtrado de impurezas, gracias a su versatilidad y su capacidad experimental (Figura 4).

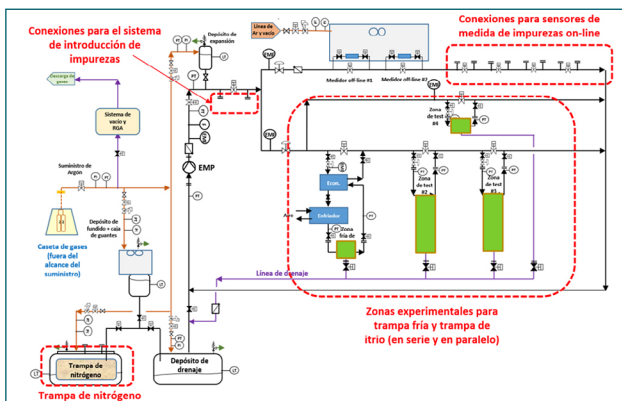


Figura 4. Diseño conceptual de LITEC.

El laboratorio de radiofrecuencia de IFMIF-DONES

El sistema de RF de IFMIF-DONES es el encargado de suministrar la potencia a las cavidades aceleradoras [7]. Siendo el sistema más voluminoso del acelerador, constará de 56 estaciones de RF de estado sólido, operando a 175 MHz en onda continua. Entre otros desafíos, el sistema de RF alimentará al RFQ más largo y potente del mundo, con ocho estaciones de 200 kW perfectamente sincronizadas y equilibradas en amplitud y fase, como si de una única estación se tratase [8].

CIEMAT dispone en la actualidad de un laboratorio de RF de alta potencia: el HPRF Lab (High Power RF Laboratory), ubicado en Leganés (Madrid). Este laboratorio alberga una fuente de RF de 200 kW y onda continua en 175 MHz, similar a las utilizadas en el acelerador LIPAc. En el HPRF Lab de CIEMAT se acondicionaron los acopladores de RF del SRF linac de LIPAc y ahora se está empleando para el ensayo y validación de nuevos prototipos para el Sistema de RF de IFMIF-DONES [9,10]. Durante su ciclo de vida, IFMIF-DONES requerirá la validación de prototipos y procesos y el acondicionamiento de componentes. Para ello, se implementará el Laboratorio de RF de IFMIF-DONES, que podrá albergar hasta dos fuentes de RF de 210 kW de potencia a 175 MHz basadas en un novedoso sistema de combinación por cavidad resonante [9,10] (Figura 5).

Instalación experimental MuVacAS

La instalación experimental MuVacAS (Multipurpose Vacuum Accident Scenarios) recreará los últimos 30 m de la línea de transporte de haz del acelerador y su interfaz con el blanco de litio. A diferencia de otras instalaciones que disponen de una ventana de separación en esa interfaz, en IFMIF-DONES esto no es posible debido a la alta potencia del haz (5 MW) y la relativamente baja energía de sus deuterones (40 MeV), que implicaría la deposición de toda esta potencia en la eventual ventana de separación, sin poder evacuarla. El inconveniente de que estas dos cámaras a vacío estén unidas es que, en ciertos escenarios accidentales muy poco probables la línea del acelerador podría actuar como vía de transporte de aire, agua, gas o litio, con el consiguiente riesgo de reacción exotérmica y de movilización de material activado desde la zona de irradiación hacia la zona del acelerador.

MuVacAS permitirá el estudio experimental de los tiempos de propagación de frentes, en caso de rotura de la cámara

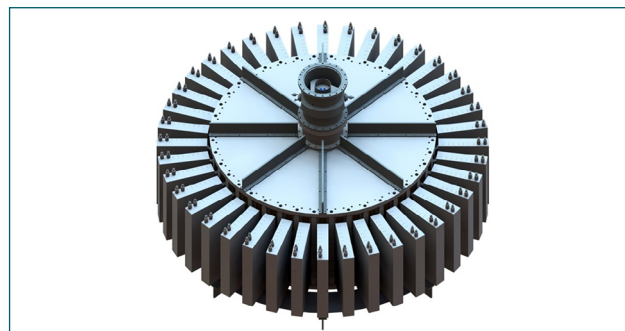


Figura 5. Fuente de RF de alta potencia basada en combinación por cavidad resonante.

y la validación de los sistemas de protección y seguridad diseñados para mitigar tales accidentes. La velocidad de propagación de los frentes de onda en el caso de pérdida de vacío es uno de los parámetros clave para la eficacia de los sistemas de seguridad. Estas velocidades (entre 50 y 2000 m/s) dependen en gran medida de las condiciones iniciales y los procesos de generación de ondas de choque [11-13]. El modelado de estos eventos es muy complejo debido a las condiciones de ultra alto vacío y a los distintos regímenes de fluidos que estarían presentes [13]. La instalación MuVacAS se empleará por tanto para obtener datos experimentales que validen y complementen las simulaciones.

El STUMM-Proto

Antes de instalar el módulo que contendrá las muestras de materiales a ensayar (módulo de alto flujo), se debe caracterizar el espectro de irradiación de la zona de ensayo en la que irá situado. Para ello se utilizará un módulo de geometría similar, en el que en lugar de muestras de materiales se instalarán distintos tipos de sensores y al que se denomina *Start-Up Monitoring Module* (STUMM). El STUMM-Proto es el experimento diseñado para validar y caracterizar los detectores que alojará este sistema. Para ello, se construirá a escala 1:1 y alojará 1/4 del total de detectores del sistema final. Los detectores previstos medirán el flujo de neutrones, la radiación gamma, el calentamiento nuclear y la temperatura. La densidad espacial de los detectores será la misma que en el sistema final a fin de reproducir eventuales problemas de señales inducidas debidos a la proximidad entre detectores. Desde el punto de vista electrónico, también reproducirá las limitaciones existentes en cuanto al transporte y la adquisición de las señales de los detectores, que serán muy débiles.

STUMM-Proto se someterá a un programa experimental en el cual será irradiado tanto en fuentes de neutrones como en fuentes de radiación gamma, para comprobar y corregir los modelos de respuesta de los detectores. Estos modelos corregidos permitirán generar un mapa de campos neutrónicos y de radiación gamma en la zona de irradiación de IFMIF-DONES.

Experimento de validación de mecanismo de conexión/desconexión por manipulación remota

El blanco de litio es el elemento en el que se intersectan el haz de deuterones proveniente del acelerador y la cortina de litio líquido que circula por el lazo de litio. Debido a la fuerte irradiación a la que estará sometida esta parte de la instalación, el desmontaje de este elemento, para su mantenimiento, requerirá del uso de herramientas de manipulación remota. En concreto, la unión entre el propio blanco de litio y los conductos del haz que provienen del acelerador es crítica. El mecanismo de conexión y desconexión debe ser operado remotamente mediante un brazo robótico.

Se ha diseñado un sistema de unión que permite su conexión y desconexión operando únicamente los barras de apriete de la brida articulada y el tornillo vertical del reenvío del mecanismo de expansión y compresión. Un fuelle de borde soldado permitirá la separación de las dos bridas y también compensará las expansiones térmicas y los posi-

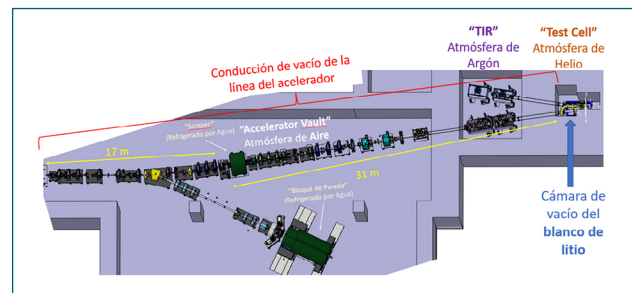


Figura 6. Esquema de los componentes que simula el experimento MuVacAS.

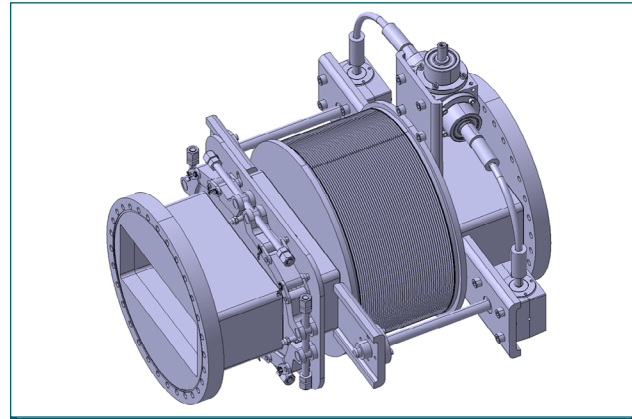


Figura 7. Modelo del prototipo de conexión.

bles desajustes de posicionamiento. La Figura 7 muestra el modelo del prototipo que, tras su ensamblado, se validará en las instalaciones del DRP (Divertor Refurbishment Platform) de la agencia italiana ENEA.

Entornos virtuales para mantenimiento en IFMIF-DONES

Las tareas de mantenimiento en una infraestructura científica de gran tamaño son complejas y diversas. Dichas tareas deben ser cuidadosamente planificadas desde las etapas iniciales de diseño. Esto es aún más relevante cuando muchas de las operaciones de mantenimiento deben realizarse mediante manipulación remota.

Las simulaciones de realidad virtual representan una aproximación efectiva para analizar las tareas de mantenimiento desde las etapas más tempranas de diseño. Esto permite visualizar la realización de tareas de mantenimiento complejas, permitiendo la detección temprana de posibles inconsistencias o incompatibilidades entre los distintos componentes y sus operaciones.

El laboratorio VALERIA (*Virtual reAlity Lab for sciEntific and industRIal fAcilities*) desarrolla simulaciones de las principales tareas de mantenimiento para IFMIF-DONES. Tal y como se muestra en la Figura 8, estas simulaciones integran todos los elementos relevantes de la instalación.

Esta tecnología será también crítica durante la fase operativa para el entrenamiento de operadores. Por otro lado, el entorno virtual proporcionará una visualización del estado de la instalación con un número potencialmente ilimitado de cámaras virtuales, permitiendo que el operador tenga un conocimiento completo de lo que está ocurriendo en el sistema físico, independientemente de las limitaciones de las cámaras físicas.



Figura 8. Imagen correspondiente a la simulación con entornos virtuales del reemplazo del HEFT scraper en el sistema del acelerador de IFMIF-DONES.

La Sala Espejo del acelerador prototipo LIPAc

La sala espejo, es un laboratorio desde donde monitorizar y apoyar las operaciones realizadas en el prototipo del acelerador de IFMIF-DONES, denominado Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc), ubicado en Rokkasho (Japón). La sala espejo ha sido concebida para que los científicos puedan supervisar, en remoto y en tiempo real, los experimentos llevados a cabo en LIPAc. Este seguimiento permitirá conocer con detalle los parámetros involucrados, bien mediante el acceso a las mismas interfaces de control, bien mediante la consulta de datos históricos para su procesamiento y análisis.

La sala espejo también ayudará a entender el funcionamiento y la puesta en marcha del acelerador, permitiendo el entrenamiento temprano de operadores, técnicos y científicos y la recopilación de lecciones aprendidas para IFMIF-DONES.

El Laboratorio para el Estudio Hidrológico de Sistemas de Drenaje Sostenible. LabHidroSuDS

Toda infraestructura produce un impacto en el ciclo hidrológico de su emplazamiento. En concreto, aumentan los volúmenes de escorrentía, mientras que disminuyen los tiempos de respuesta, provocando, globalmente, un aumento del caudal de agua pluvial, que es necesario gestionar para evitar problemas de drenaje.

Los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) imitan el comportamiento del terreno natural, de manera que su uso permite paliar o incluso eliminar el impacto negativo que podría tener el desarrollo urbanístico en el ciclo hidrológico. Utilizando sistemas como cubiertas verdes y pavimentos permeables, será posible adecuar algunas de las instalaciones de IFMIF-DONES para reducir su impacto hidrológico.

LabHidroSuDS, integrado en METEO-DONES, es una instalación destinada a ensayar cubiertas verdes y pavimentos permeables, contando con 40 parcelas y simulador de lluvia para su estudio (Figura 10).



Figura 9. Vista parcial de la sala espejo.



Figura 10. Vista parcial del laboratorio.

REFERENCIAS

- [1]. J. Knaster et al., "Overview of the IFMIF/EVEDA project" 2017 Nucl. Fusion 57 102016.
- [2]. A. Ibarra et al., "A stepped approach from IFMIF/EVEDA toward IFMIF", Fusion Science and Technology, 66:1, 252-259, DOI: 10.13182/FST13-778.
- [3]. F.S. Nitti et al. "Lithium Loop and Purification System of DONES: Preliminary Design" Preprint of Paper to be submitted for publication in Proceeding of 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT)
- [4]. S. Hendricks et al. "Numerical investigation of hydrogen isotope retention by an yttrium pebble-bed from flowing liquid lithium" 2020 Nucl. Fusion 60 106017
- [5]. N. Holstein et al. "Development of an electrochemical sensor for hydrogen detection in liquid lithium for IFMIF-DONES" Fusion Engineering and Design 146 (2019) 1441-1445
- [6]. B. Garcinuño et al., "The CIEMAT LiPb Loop Permeation Experiment", Fusion Engineering and Design 146 (2019) 1228-1232.
- [7]. D. Regidor, et al., "IFMIF-DONES RF System", Fusion Engineering and Design, Volume 167, Jun. 2021, no. 112322, doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112322.
- [8]. M. Weber et al., "Functional Overview of the RF Power System for the LIPAc RFQ," in IEEE Transactions on Plasma Science, doi: 10.1109/TPS.2021.3102840.
- [9]. C. de la Morena, et al., "Single-step port-reconfigurable cavity combiner with high efficiency", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 972, Aug. 2020, 164108, DOI: 10.1016/j.nima.2020.164108.
- [10]. C. de la Morena, et al., "First validation experiments of the prototype solid state RF system for IFMIF-DONES", Fusion Engineering and Design, vol.168, Jul. 2021, no. 112396, doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112396.
- [11]. R. Dhuley, PhD Thesis: Gas Propagation in a Liquid Helium Cooled Vacuum Tube Following a Sudden Vacuum Loss, Florida: Florida State University, 2016.
- [12]. N. Garceau, S. Bao, W. Guo, «Heat and mass transfer during a sudden loss of vacuum in a liquid helium cooled tube – Part I: Interpretation of experimental observations» International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 129, pp. 1144-1150, 2018.
- [13]. M. Ady, M. Hermann, R. Kersevan, G. Vandoni, D. Ziemianski, «Leak Propagation Dynamics for the HIE-ISOLDE Superconducting Linac,» Proceedings IPAC, 2014. ■