

# Accelerator Driven System (ADS)

**Bruce Yee-Rendon\***

*Nuclear Transmutation & Accelerator Division  
Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)  
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)*

**Acknowledgments:** JAEA-ADS and J-PARC linac for their support, and MYRRHA and Ci-ADS for the material.

\*byee@post.j-parc.jp

# Contenido

- Motivación
- Introducción
- Estatutos de los proyectos de ADS en el mundo
- Proyecto JAEA-ADS

# Motivación (reto)

“La energía nuclear representa una fuente confiable, limpia y accesible de energía, reduciendo el impacto negativo en el cambio climático.... Un incremento en su uso se espera en la siguientes décadas”

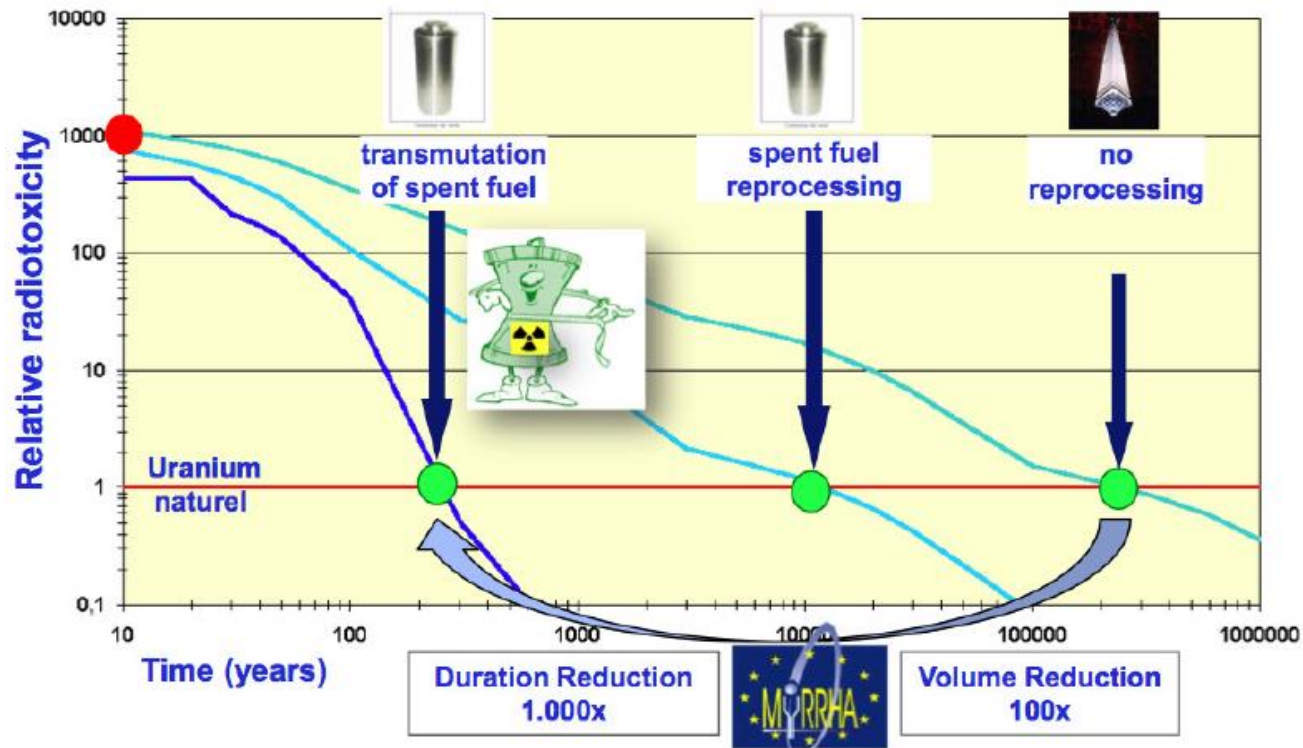
International Atomic Energy Agency (IAEA)

Uno de los principales reto es almacenamiento de los residuos nucleares.

- **Alta radioactividad** y **el largo tiempo** de vida de los residuos, hace su almacenamiento de **alto riesgo** y **costoso**.

# Motivación (solución posible)

Accelerator Driven (Subcritical) System (ADS) es un prometedor para la transmutación de los residuos nucleares para la **reducción** de su **radioactividad** y su tiempo de **vida**.



Cortesía del proyecto MYRRHA

# Introducción

- ADS consiste en un acelerador partículas con una potencia del haz del orden de MW acoplado a un core subcritical<sup>1</sup> reactor

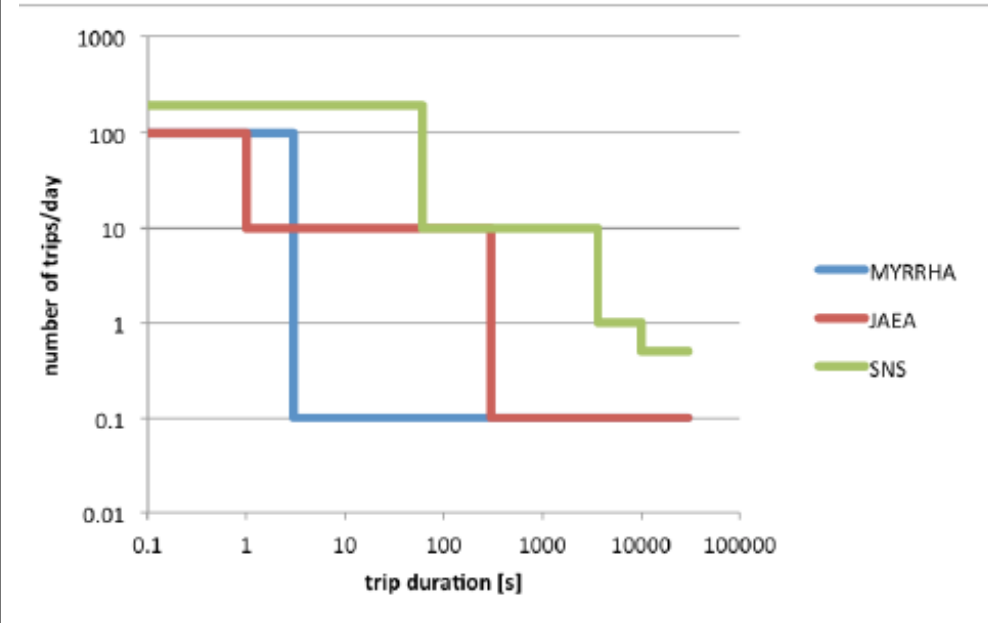
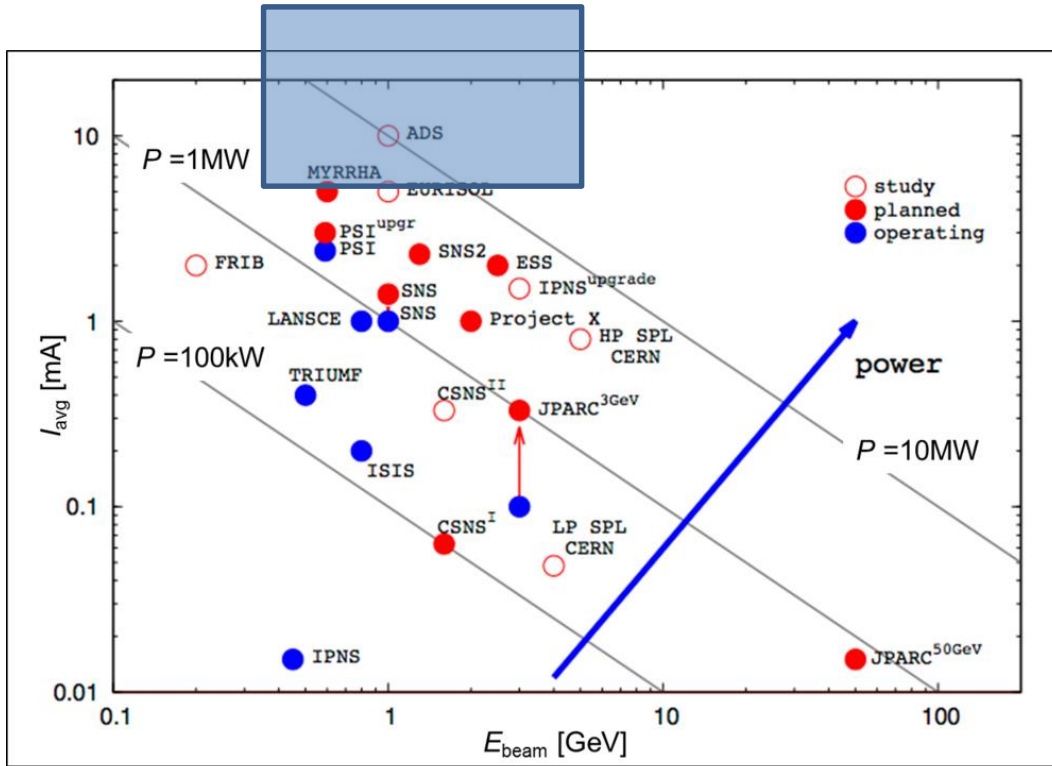


- El ADS viene del concept de “Energy Amplifier” de Carlo Rubbia<sup>2</sup>.
- Características generales del acelerador del ADS:
  - Decenas de **MW** (energía del haz 1~2 GeV, corriente del haz ~mA)
  - Operación en Continuous Wave (**CW**)
  - Un **estricto** control en el numero de fallos y su duración
- Un acelerador lineal superconductor operado en CW representa el candidato mas viable para el ADS

<sup>1</sup>El sistema no puede operador sin una fuente externa de neutrones para mantener la reacción

<sup>2</sup>F. Carminati et al CERN/at/93-47(ET) 1993. Seminario de la CMAP

# Retos del ADS



Cortesía del proyecto MYRRHA

Cortesía de R Schmidt

ADS operaran con a la mas **alta potencia** del haz y con el **menor** cantidad de **fallos** del haz.



# Proyectos del ADS alrededor del mundo

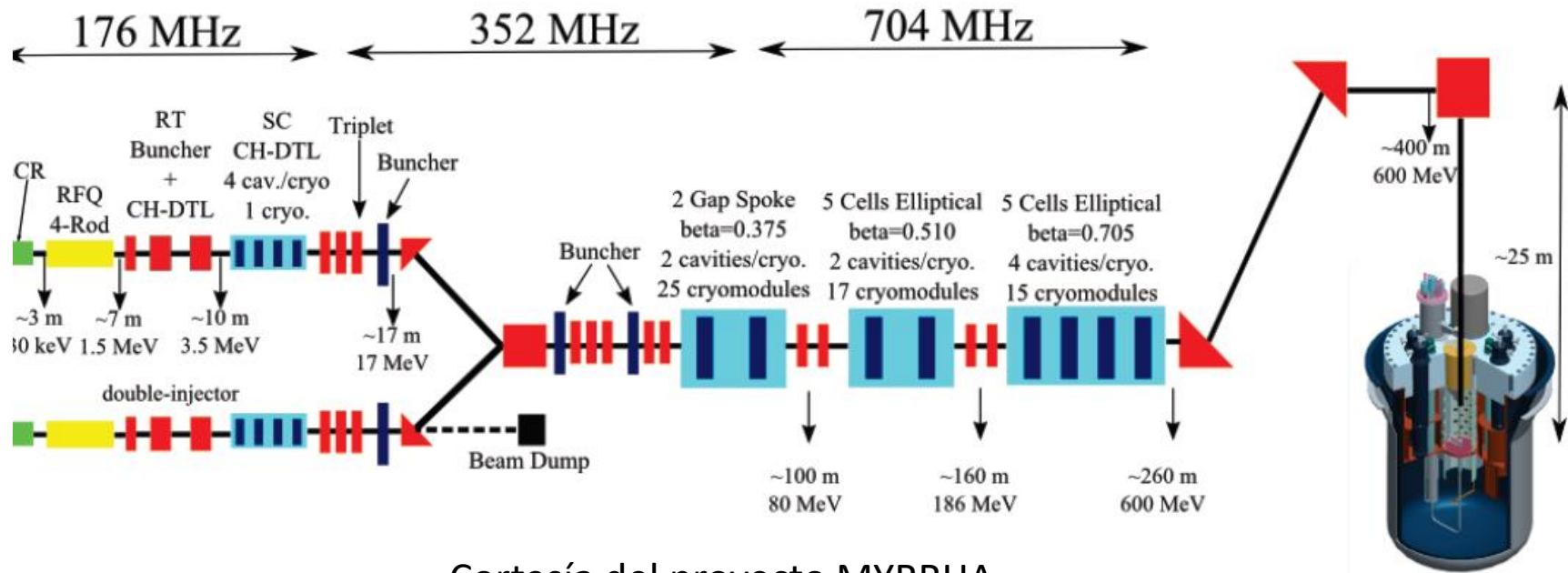


Los tres grandes proyectos de ADS son:

- Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA)
- Chinese-ADS
- JAEA-ADS

Project	MYRRHA	C-ADS	JAEA-ADS
Energy [GeV]	0.6	1.5	1.5
I [mA]	4	10	20
Beam Power[MW]	2.4	15	30

# MYRRHA



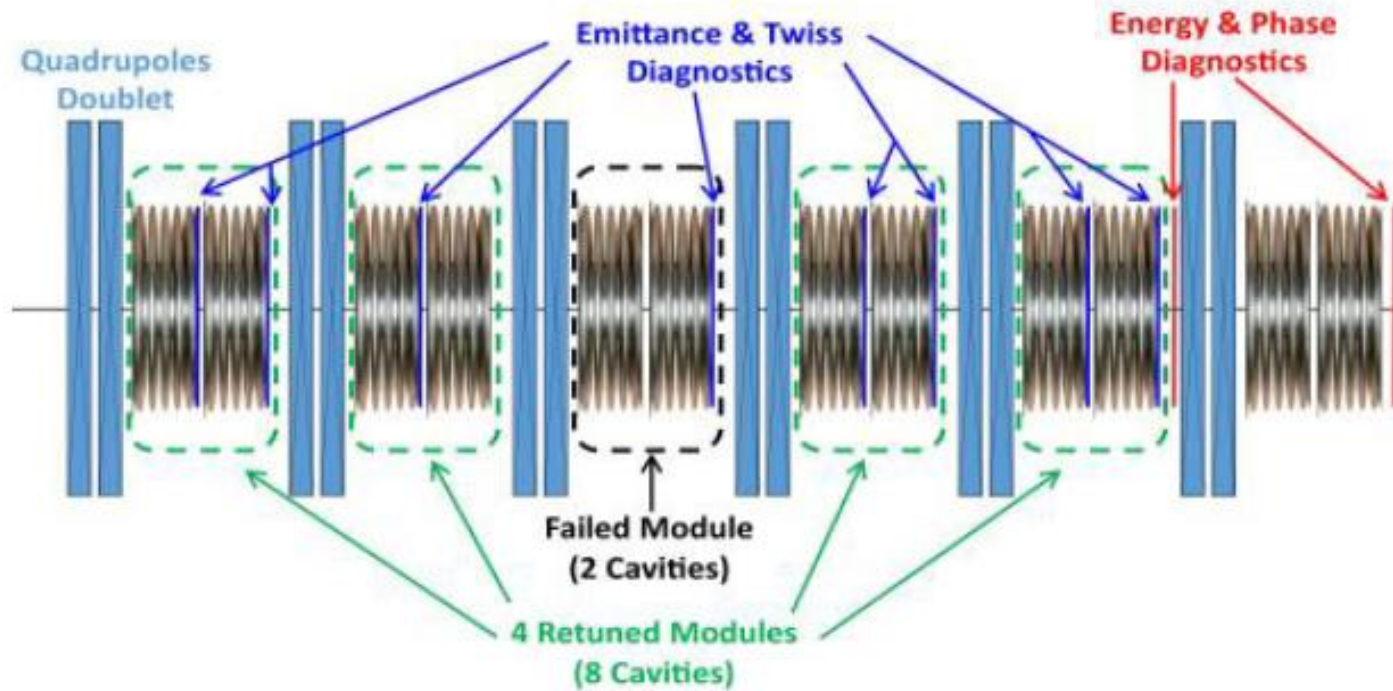
Cortesía del proyecto MYRRHA

Para poder reducir el número de fallos las siguientes estrategias son propuestas:

- **Doble inyector** (para las energías bajas)
- Esquema de **fault compensation**



# Fault compensation<sup>1</sup>



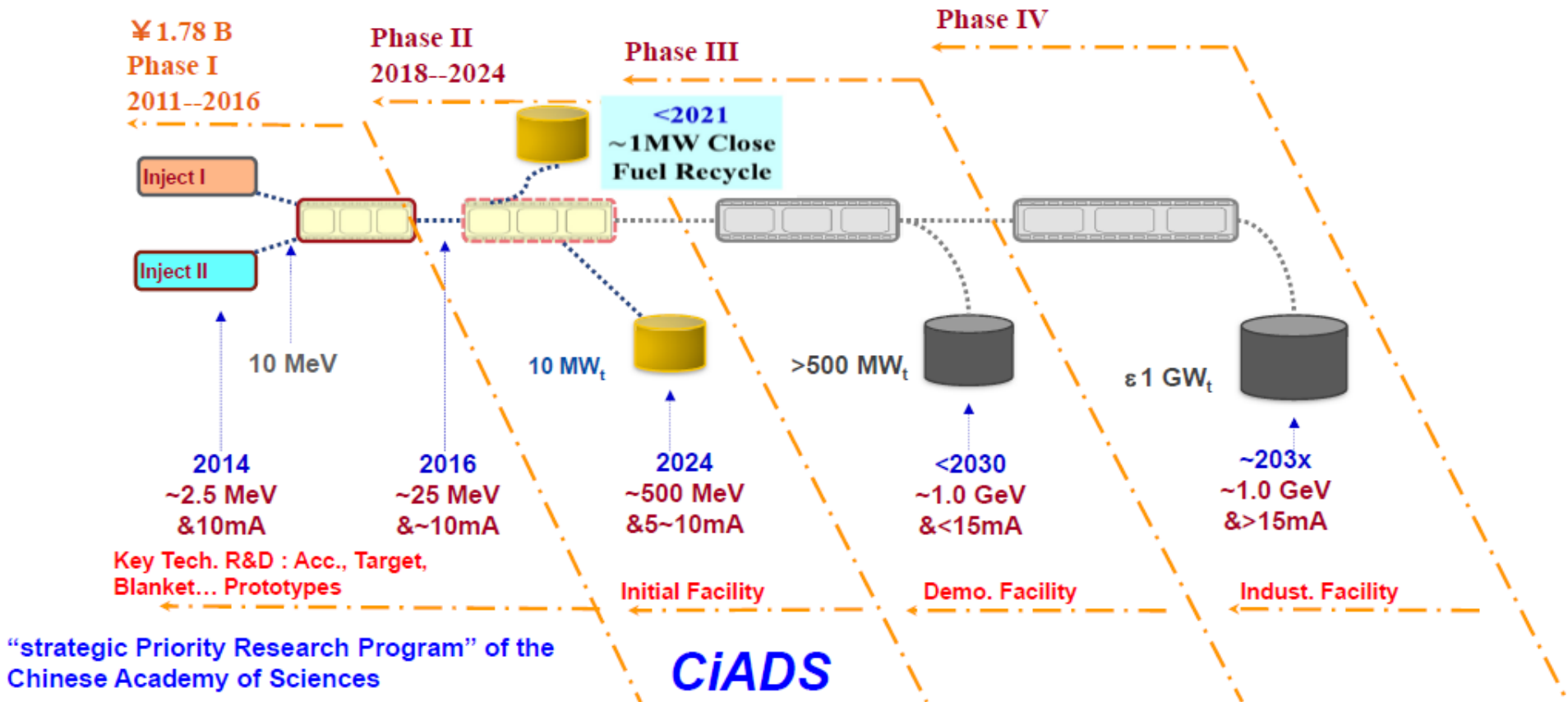
Cortesía del F. Bouly

\* J-L Biarrote, D. Uriot Phys. Rev. St-Accel. & Beams, 11, 072803 (2008)

# C-ADS



## ADS/ADANES Roadmap in China



# JAEA-ADS

Japanese Atomic Energy Agency (JAEA) junto con KEK operan el Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)



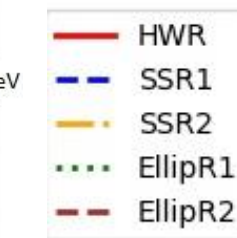
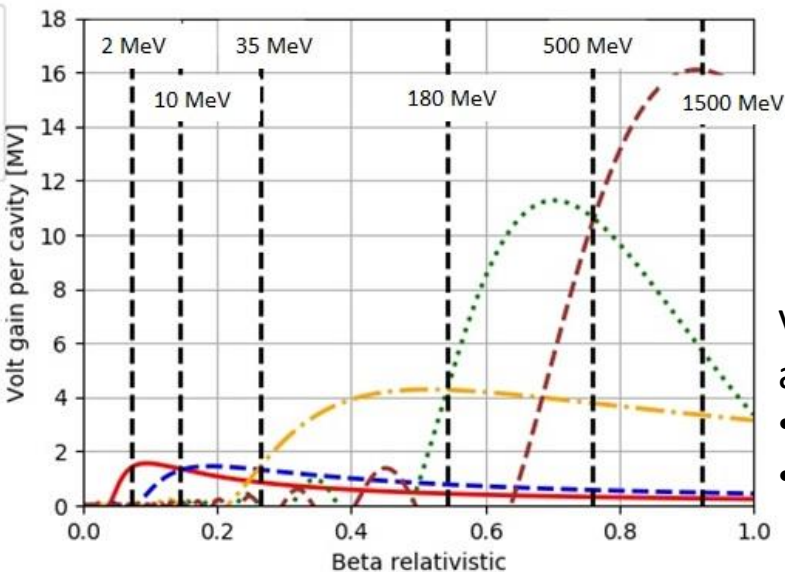
# JAEA-ADS

- JAEA esta desarrollando un CW superconducting proton linac que tendrá una energía final de 1.5 GeV y una corriente de 20 mA (potencia del haz de **30 MW**)
- El estatus del R&D del acelerador se divide como:
  - Diseño de las **cavidades superconductoras**
  - Diseño de la **óptica del haz**

# Cavidades de SRF

Punto de partida del modelo de la cavidad SRF		
Cavidad	Freq [MHz]	# of Cell
HWR	162	2
SS	324	2
Elliptical	648	5

- La optimización del numero de cavidades y  $\beta_g$  que fueron seleccionados para obtener **el máximo voltaje ganado por cavidad + suave transición**



Voltaje ganado fue calculado asumiendo:

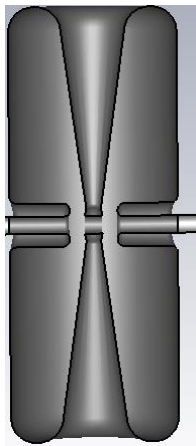
- E campo sinusoidal
- Synchronous phase de  $-30^\circ$

Parámetros de las cavidades SRF del JAEA-ADS		
Cavidad	Freq [MHz]	$\beta_g$
HWR	162	0.08
SSR1	324	0.16
SSR2	324	0.43
EllipR1	648	0.68
EllipR2	648	0.89

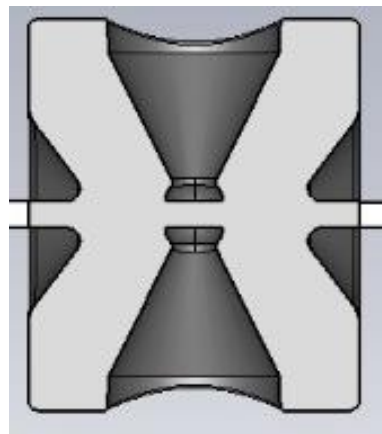
# Diseño de las cavidades

- Las cavidades se diseñaron usando los programas : CST y Superfish (solamente cavidades elípticas)
- Los diseños fueron optimizados para obtener **bajos electromagnéticos picos** y bajo **power dissipation**.

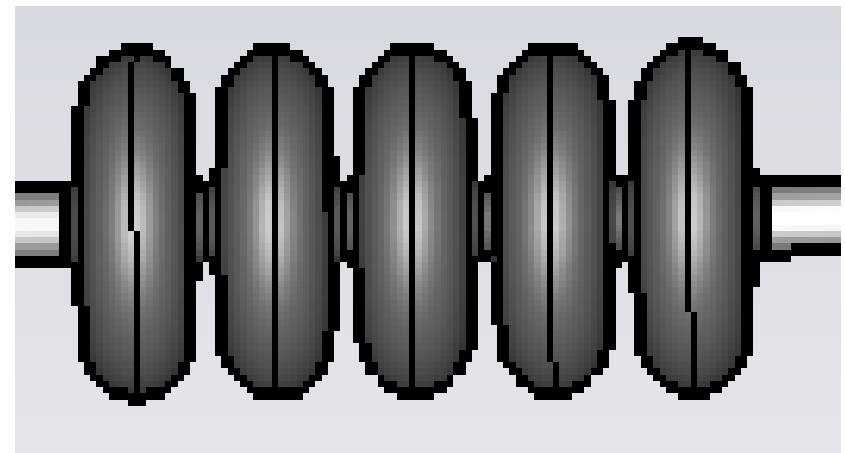
HWR



SSR



Ellip





# Resumen de las cavidades SRF

- Los modelos de las cavidades<sup>1</sup> presenta un **buen rendimiento** en términos de valores de la figure de méritos y son **similares** a otros proyectos (PIIP-II & C-ADS)

Figures of merits of the PIP-II and JAEA-ADS HWR :

Parameters	PIP-II	JAEA-ADS
$\beta_g$	0.11	0.08
Frequency [MHz]	162.5	162
Eacc [MV/m]		9.7
Epk/Eacc	4.62	4.21
Hpk/Eacc [mT/MV/m]	4.97	3.41
R/Q [ $\omega$ ]	275	285.39
G [ $\omega$ ]	48	59.15
TTF	-	0.77

Figures of merits of the PIP-II, C-ADS and JAEA-ADS SS low

Parameters	PIP-II	C-ADS	JAEA-ADS
$\beta_g$	0.22	0.12	0.16
Frequency [MHz]		325	324
Eacc [MV/m]		9.7	
Epk/Eacc	3.84	4.5	4.7
Hpk/Eacc [mT/MV/m]	5.81	6.40	6.68
R/Q [ $\omega$ ]	242	142	212.72
G [ $\omega$ ]	84	63	64.78
TTF	-	-	0.75

Figures of merits of PIP-II and JAEA-ADS SS high

Parameters	PIP-II	JAEA-ADS
$\beta_g$	0.47	0.43
Frequency [MHz]	325	324
Eacc [MV/m]		11.4
Epk/Eacc	3.50	3.55
Hpk/Eacc [mT/MV/m]	5.65	5.13
R/Q [ $\omega$ ]	296	285.80
G [ $\omega$ ]	115	129.20
TTF	-	0.77

Figures of merits of the PROJECT-X elliptical cavity and the EllipR1

Parameters	PIP-II	EllipR1	
		SF	CST
$\beta_g$	0.61	0.68	
Frequency [MHz]	650	648	
Eacc [MV/m]	15.9	15.9	
Epk/Eacc	2.26	2.15	2.17
Hpk/Eacc [mT/MV/m]	4.21	4.04	4.22
R/Q [ $\omega$ ]	378	442.78	443.22
G [ $\omega$ ]	191	208.80	208.82
Field Flatness	-	0.98	0.96

Figures of merits of the PROJECT-X elliptical cavity and the EllipR2

Parameters	PIP-II	EllipR2	
		SF	CST
$\beta_g$	0.9	0.89	
Frequency [MHz]	650	648	
Eacc [MV/m]	17.8	17.8	
Epk/Eacc	2.19	1.99	2.11
Hpk/Eacc [mT/MV/m]	3.75	3.70	4.07
R/Q [ $\omega$ ]	638	619.86	619.73
G [ $\omega$ ]	255	256.11	256.17
Field Flatness	-	0.98	0.98

<sup>1</sup>Yee-Rendon B, et al 2019 Electromagnetic design of the low beta cavities for the JAEA ADS J. Phys.: Conf. Ser. Accepted; Yee-Rendon B, et al 2019 Design of the elliptical superconducting cavities for the JAEA ADS J. Phys.: Conf. Ser. accepted

# óptica del haz

- La óptica fue diseñada usando los programas GenLinWin and TraceWin.
- El ADS requiere un excelente control en la **beam loss**, siendo el **beam halo** la mayor fuente de esto y su vez el **crecimiento** de la **emitancia** lo cual produce el beam halo.
- Para controlar el crecimiento de la emitancias en linac de protones de alta intensidad, la siguientes condiciones fueron aplicadas:
  - El phase advance ( $\sigma_{t/l}$ ) < **90°** para evitar resonancias paramétricas
  - El haz debe satisfacer la condición de **equiparticion** ( $\frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} = \frac{k_{\perp} \varepsilon_{n\perp}}{k_{\parallel} \varepsilon_{n\parallel}} = 1$ ) para evitar el intercambio de emitancia entre los planos
  - **Smooth Envelope** (un excelente match entre la diferente secciones de las cavidades, especialmente donde ocurre un cambio en la frecuencia)



# Esquema de la lattice<sup>1</sup>

El esquema de las regiones superconductoras es la siguiente

Table 2. Lattice of the superconducting sections.

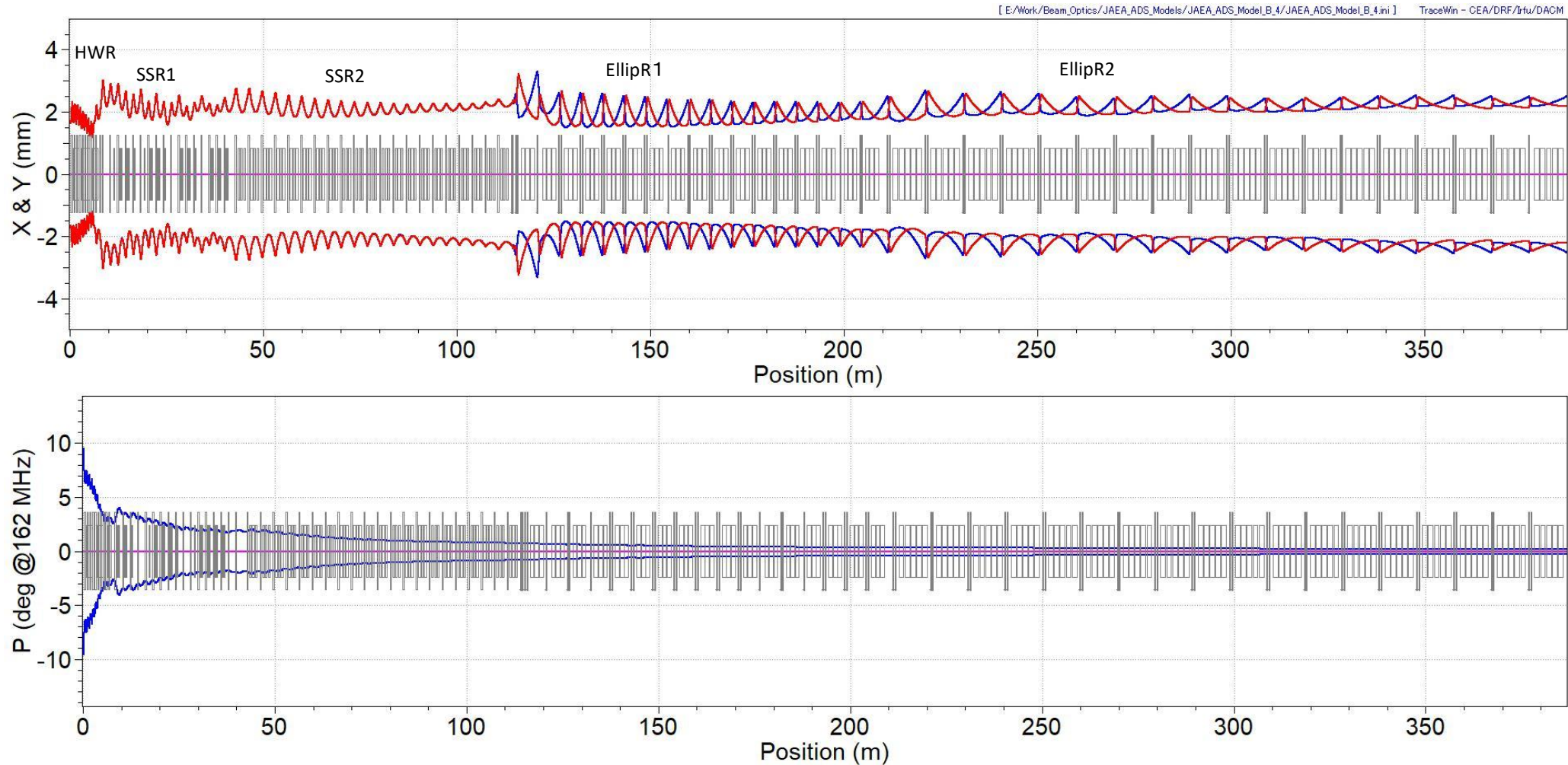
Section	HWR	SSR1	SSR2	EllipR1	EllipR2
Layout	S-C	S-C <sup>2</sup>	S-C <sup>3</sup>	DQ-C <sup>3</sup>	DQ-C <sup>5</sup>
Period length [m]	0.7	1.9	3.4	5.5	9.7

El resumen de los esquemas es

Table 3. Summary of the JAEA-ADS models.

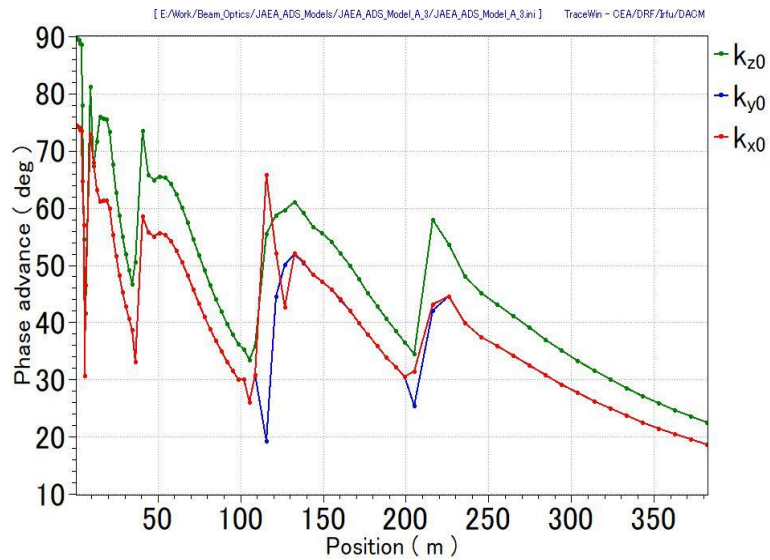
Parameters	Model A	Model B
Phase advance law	$k_{x/y} = 0.83k_z$	$k_z = 0.85k_{x/y}$
$\epsilon_{norm,rms,x/y}$ [ $\pi$ mm mrad]	0.48	0.36
$\epsilon_{norm,rms,z}$ [ $\pi$ mm mrad]	0.4	0.4
Number of cavities	247	248
Number of magnets	119	121
Linac length [m]	381.9	386.6

# JAEA-ADS rms envelope

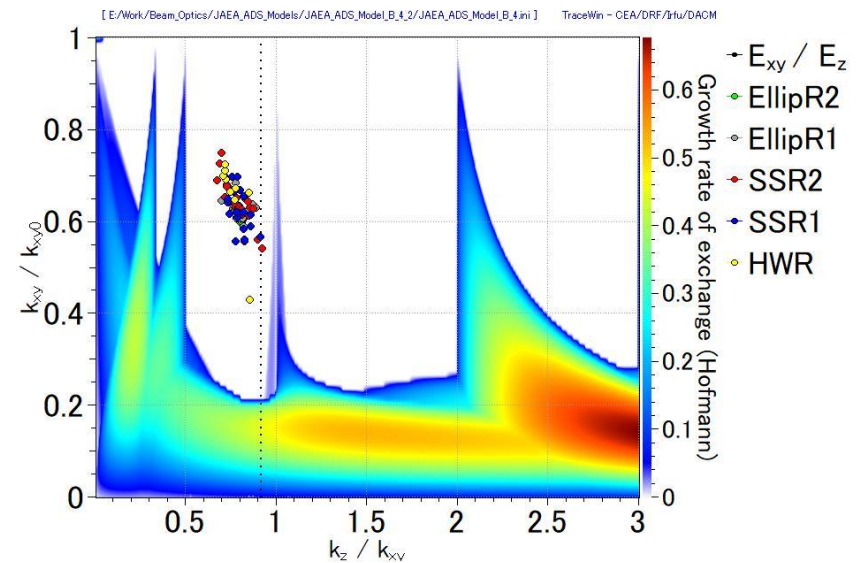
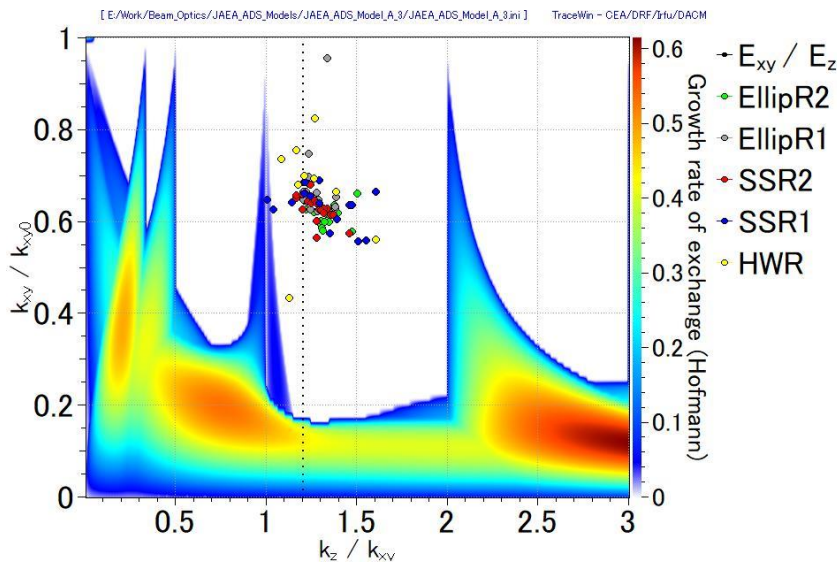
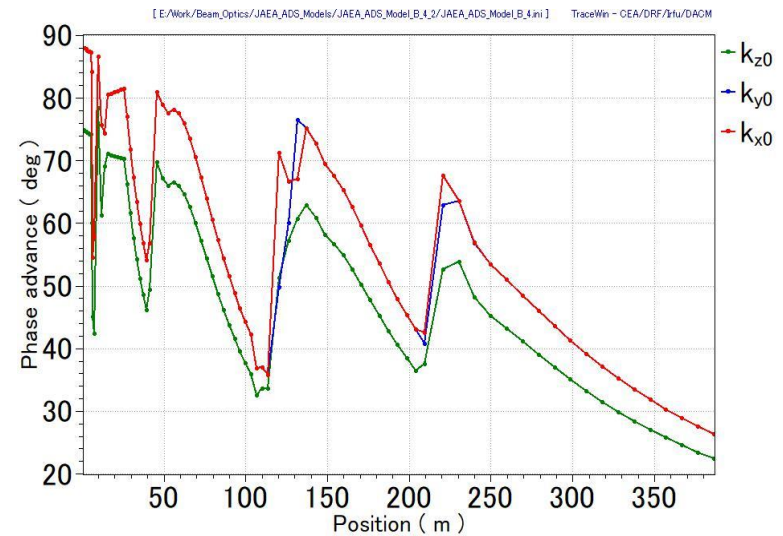


# JAEA-ADS Zero phase advance & Hoffman chart

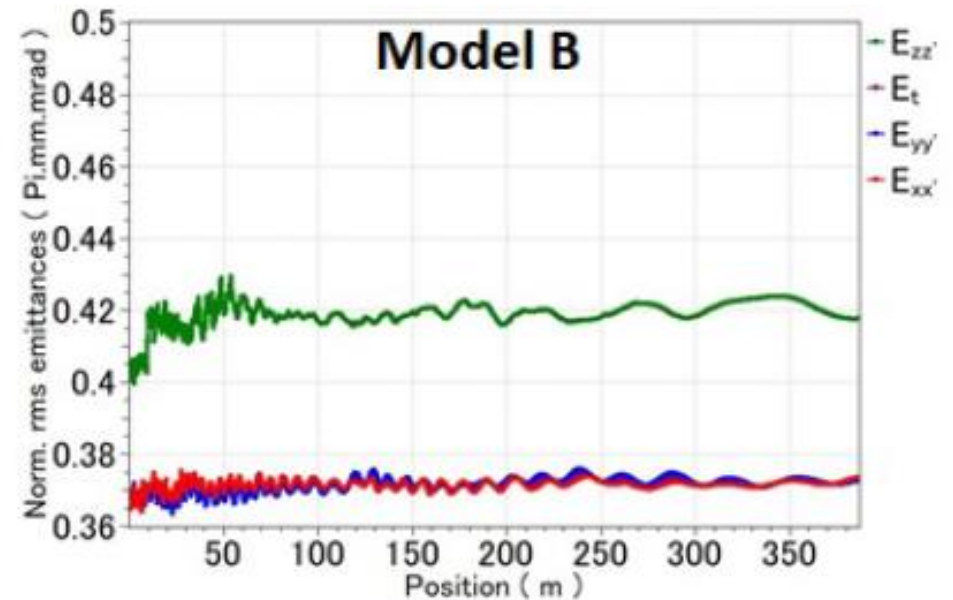
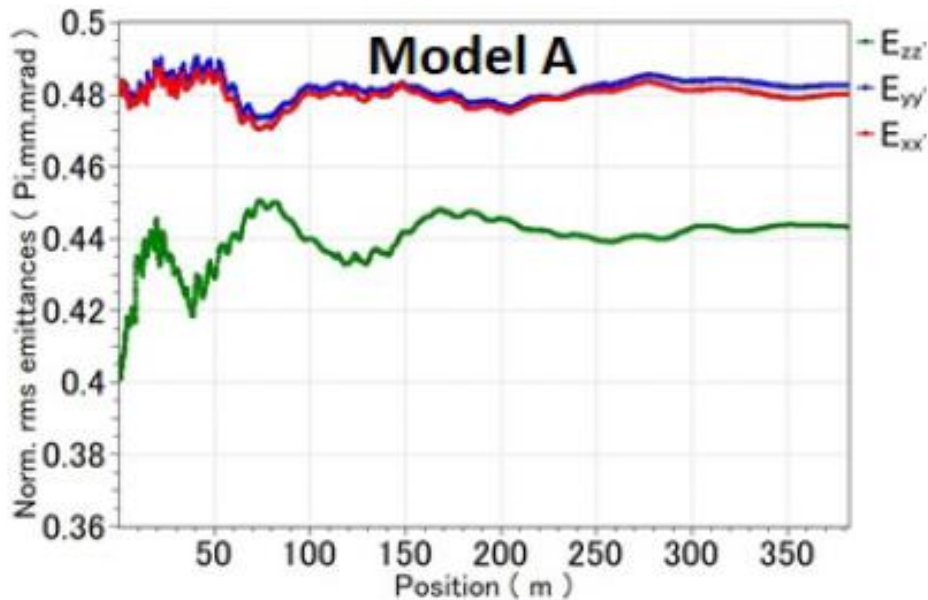
Model A



Model B



# Evolución de la Norm rms emitancias



- El resumen de la Norm rms emitancias para los modelos del JAEA-ADS

Projects	Distribution	$\epsilon_{t/lnormrms}(\pi \text{ mm mrad})$	Growth (X,Y,Z) (%)
A	Uniform	0.48/0.40	1/1/12
B	Uniform	0.364/0.4	2.6/2.5/5.7

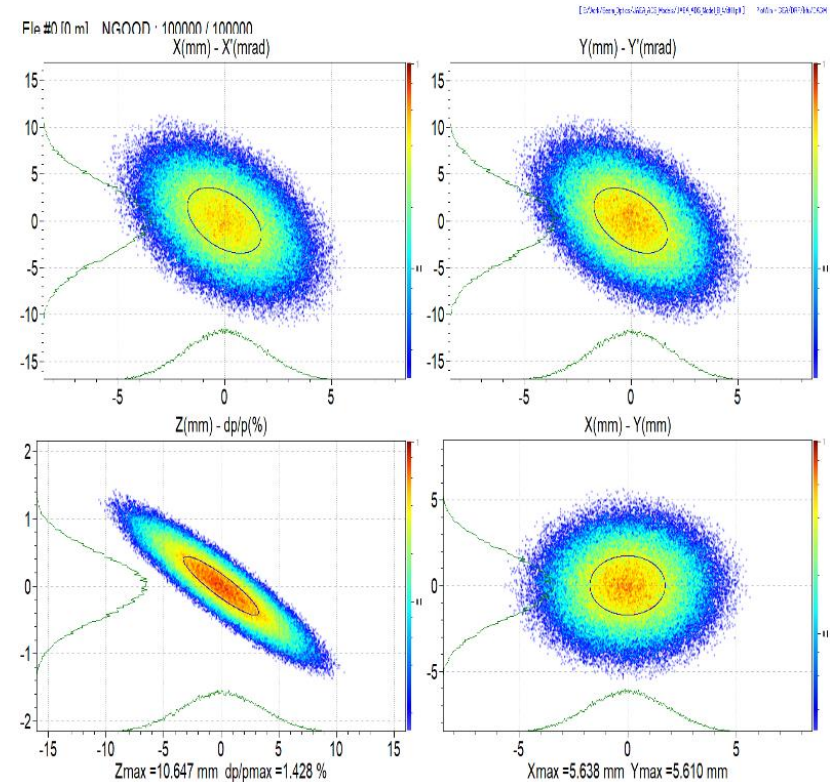
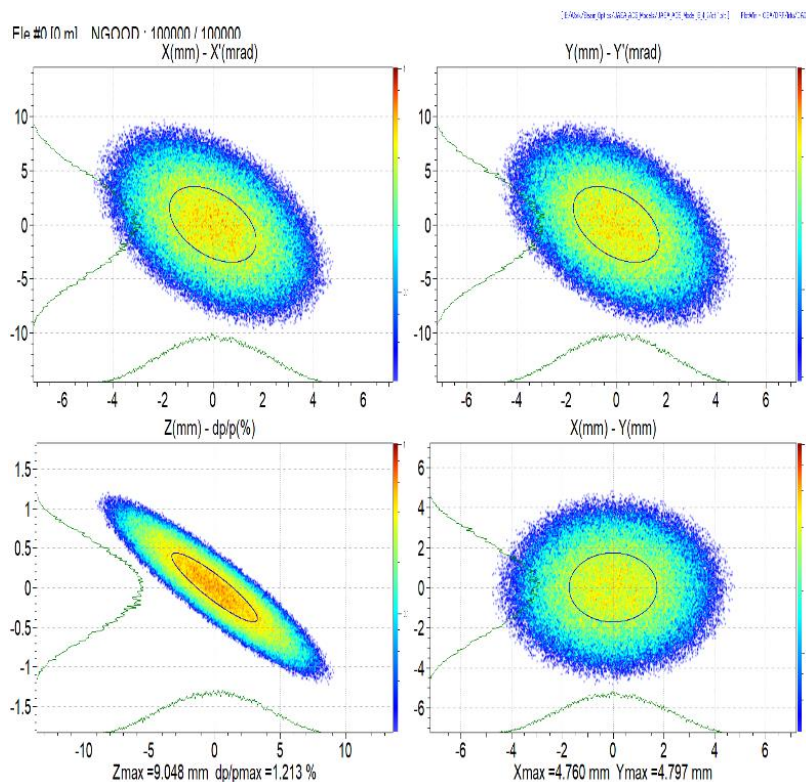


# Estudios de la formación del beam halo

- El modelo B es usado para estudiar el beam halo usando un perfil uniforme (6D Water bag) y Gaussiano ( $3\sigma$ ) con 100,000 macro partículas.

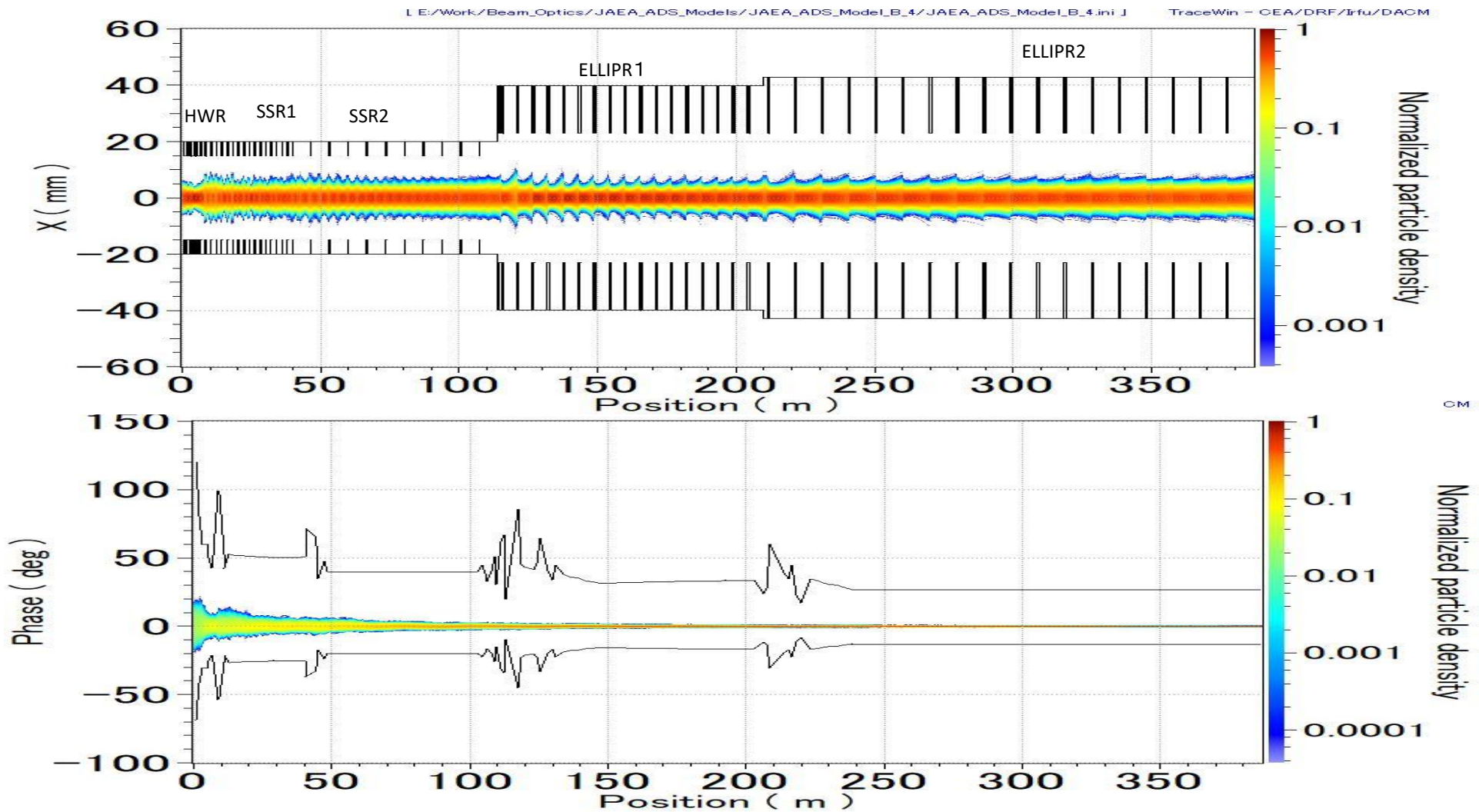
Uniform

Gaussian



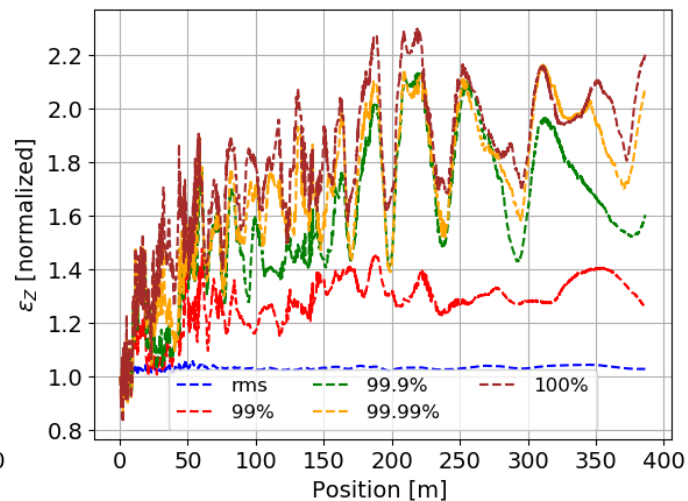
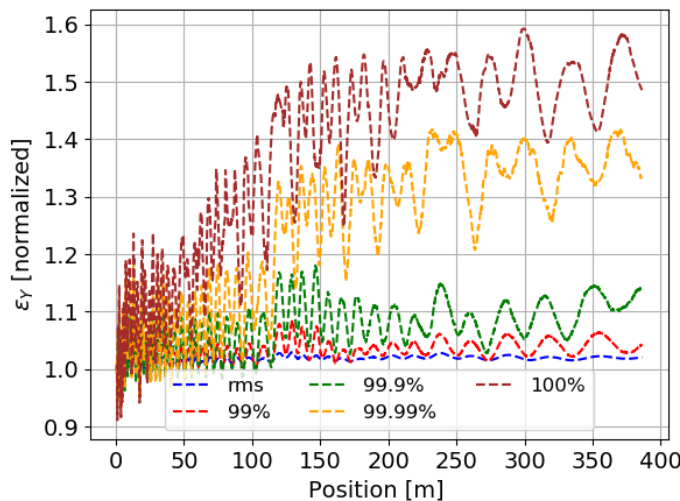
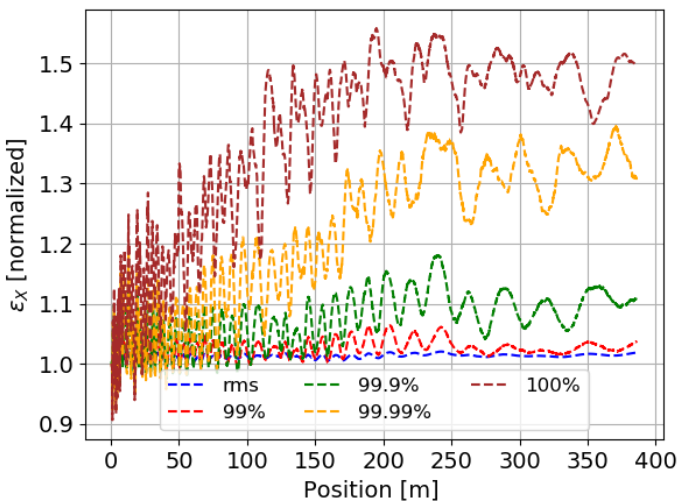
# Apertura del linac

- 6-Dimensiones distribución Gaussian ( $3\sigma$ )

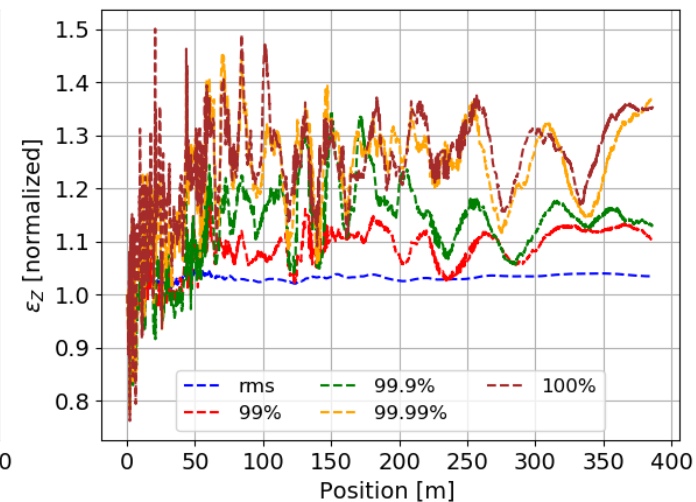
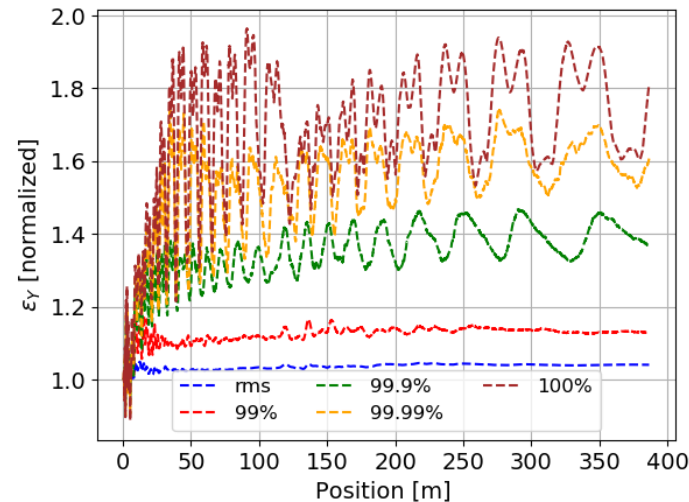
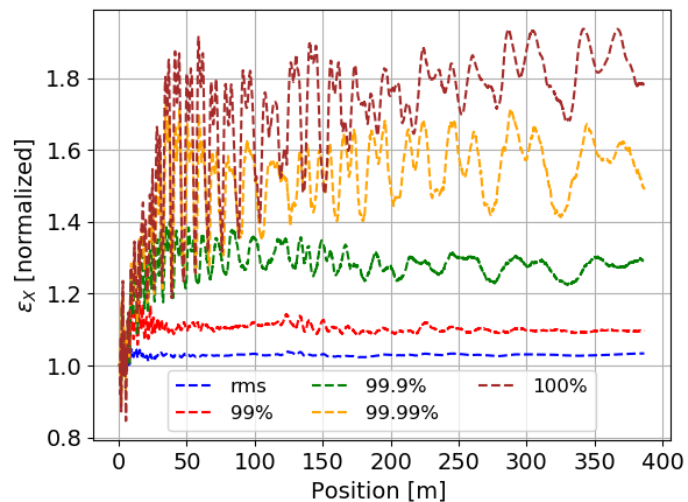


# Crecimiento de la emitancia para diferentes perfiles del haz

### Uniform



### Gaussian



# Conclusiones I

- Los modelos operan **cerca** de la región **equiparticion** y lejos de la regiones donde el crecimiento de la emitancia es grande.
- Sin embargo, ambos modelos generan **space-charge dominant beams**, y eso tiene un impacto en el crecimiento de la emitancia al principio del linac.
- El crecimiento de la emitancia Norm. rms es menor al **3%** en el plano transvesal y **12%** en el longitudinal.
- Los estudios de la formación del beam halo muestra que el **crecimiento** de la **emitancia** esta acotado entre el **50%** y el **130%** en todos los planos.



# Trabajo a futuro

- Para **mitigar** el beam loss, debemos **reducir** el beam halo, lo cual implica **controlar** el crecimiento de la emitancia.
- Trabajo a futuro:
  - Mejorar el match entre HWR and SSR1 y la ganancia de la energía ( la mayor parte del crecimiento de la emitancia ocurre en esa región)
  - El space-charge es el que mas contribuye en el crecimiento de la emitancia al principio del linac, por lo que se requiere un rediseño de la óptica para mitigar ese efecto.
  - Optimización de la configuración de la lattice

# Referencias

- Yee-Rendon B, et al 2019 Electromagnetic design of the low beta cavities for the JAEA ADS J. Phys.: Conf. Ser. Accepted
- Yee-Rendon B, et al 2019 Design of the elliptical superconducting cavities for the JAEA ADS J. Phys.: Conf. Ser. Accepted
- Yee-Rendon B, et al 2019 Beam optics design of the superconducting region of the JAEA ADS J. Phys.: Conf. Ser. accepted

Gracias por su atención !!!

どうもありがとうございました！！！！