

# Jornada de I+D en seguridad nuclear y protección radiológica

3 de marzo de 2011

### **La I+D del CSN en 2010**

José M. Conde (Jefe de la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento)

### **Investigations in support of fuel safety and reliability**

Carlo Vitanza (Head of Research and Development. Halden Reactor Project)

### **Proyecto ARTIST: atenuación del término fuente en el generador de vapor durante secuencias SGTR de accidente severo**

Luis E. Harranz (Responsable de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear. CIEMAT)

### **Participación del CSN en el proyecto SM2A (Safety Margin Assessment and Application) del CSNI**

Javier Hortal (Área de Modelación y Simulación. CSN)

### **Equipos de detección dinámica**

Juan Antonio González (CEDEX)

### **Efectos colaterales en radioterapia. Riesgo neutrónico**

Francisco Sánchez Doblado (Catedrático de Física Médica. Universidad de Sevilla)

# La I+D del CSN en 2010

José M. Conde

*Jefe de la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento. CSN*

## ÍNDICE

Generalidades

Actividades más destacadas

Perspectivas para próximos años

# ACTIVIDADES DE I+D DEL CSN EN EL AÑO 2010

J.M. Conde  
Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento  
Consejo de Seguridad Nuclear



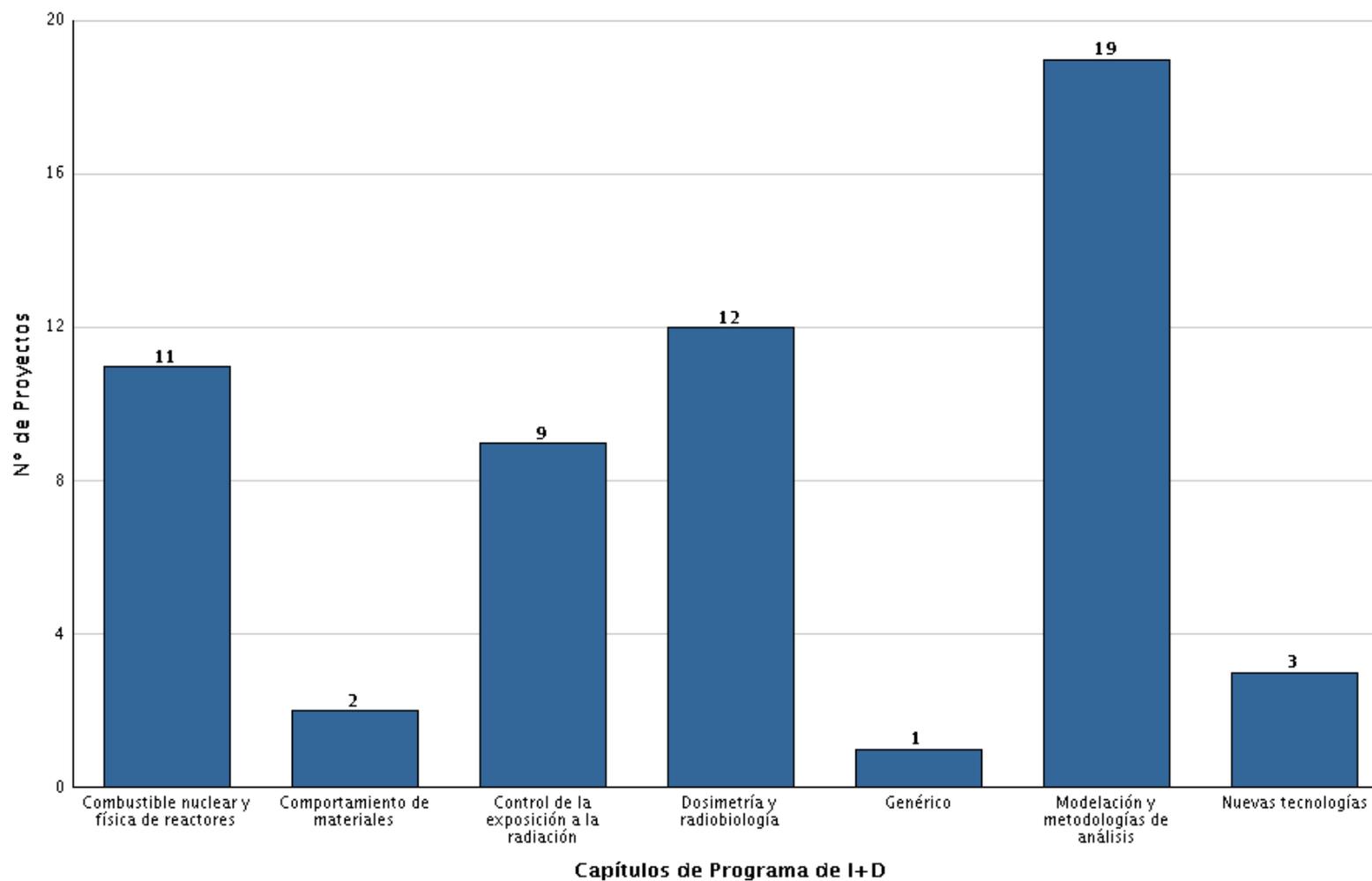
## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Generalidades
2. Actividades más destacadas
3. Perspectivas para próximos años

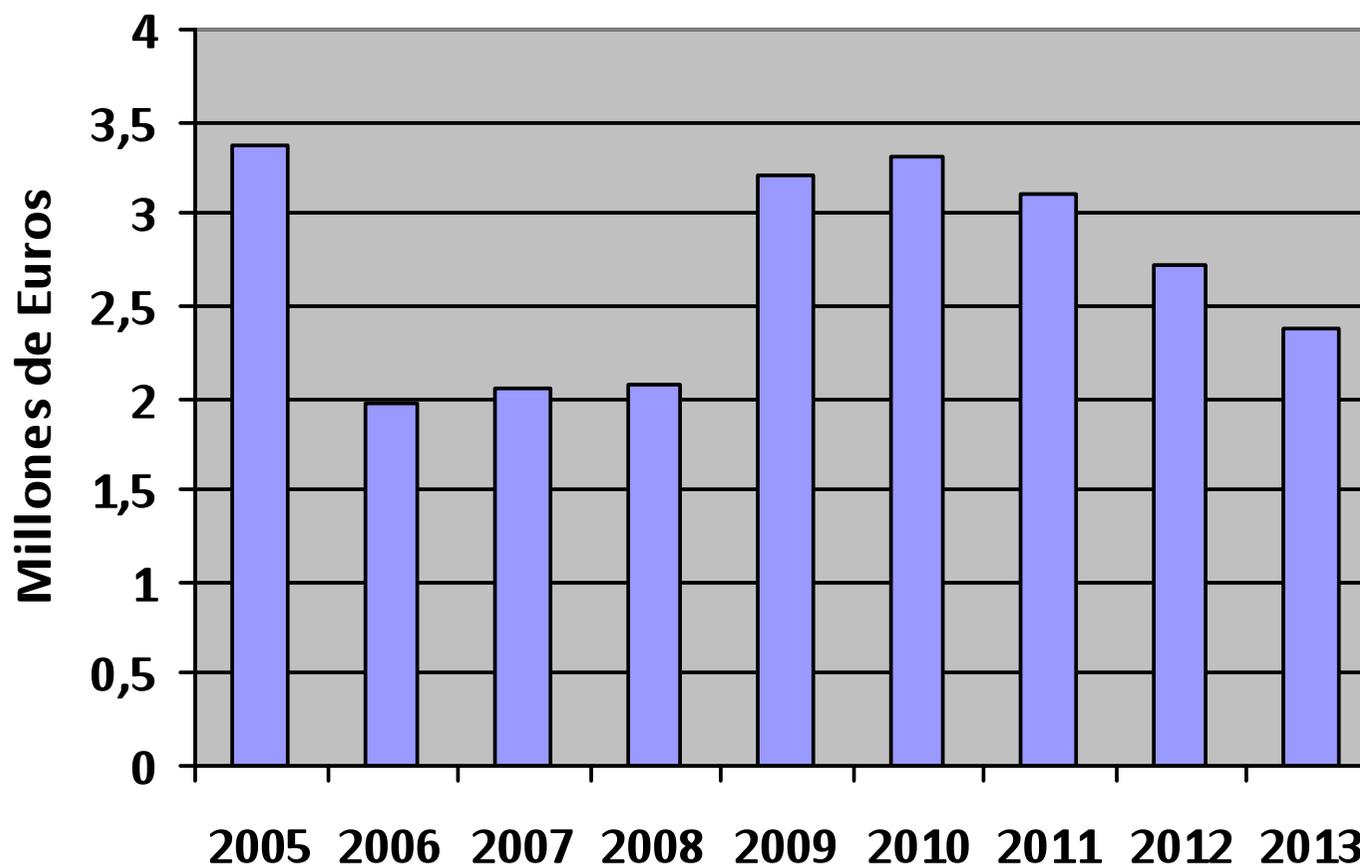
## 01 | Cartera de proyectos

- Año 2010
  - Proyectos finalizados: 4
  - Proyectos iniciados: 7
  - Proyectos en vigor en 2011: 58
  - Inversión total: 3.304.040 €
  - Más de 28 organizaciones externas involucradas
- Distribución:
  - I+D en Protección Radiológica: 22 proyectos
  - I+D en Seguridad Nuclear: 27 proyectos
  - Acuerdos de tipo general: 9

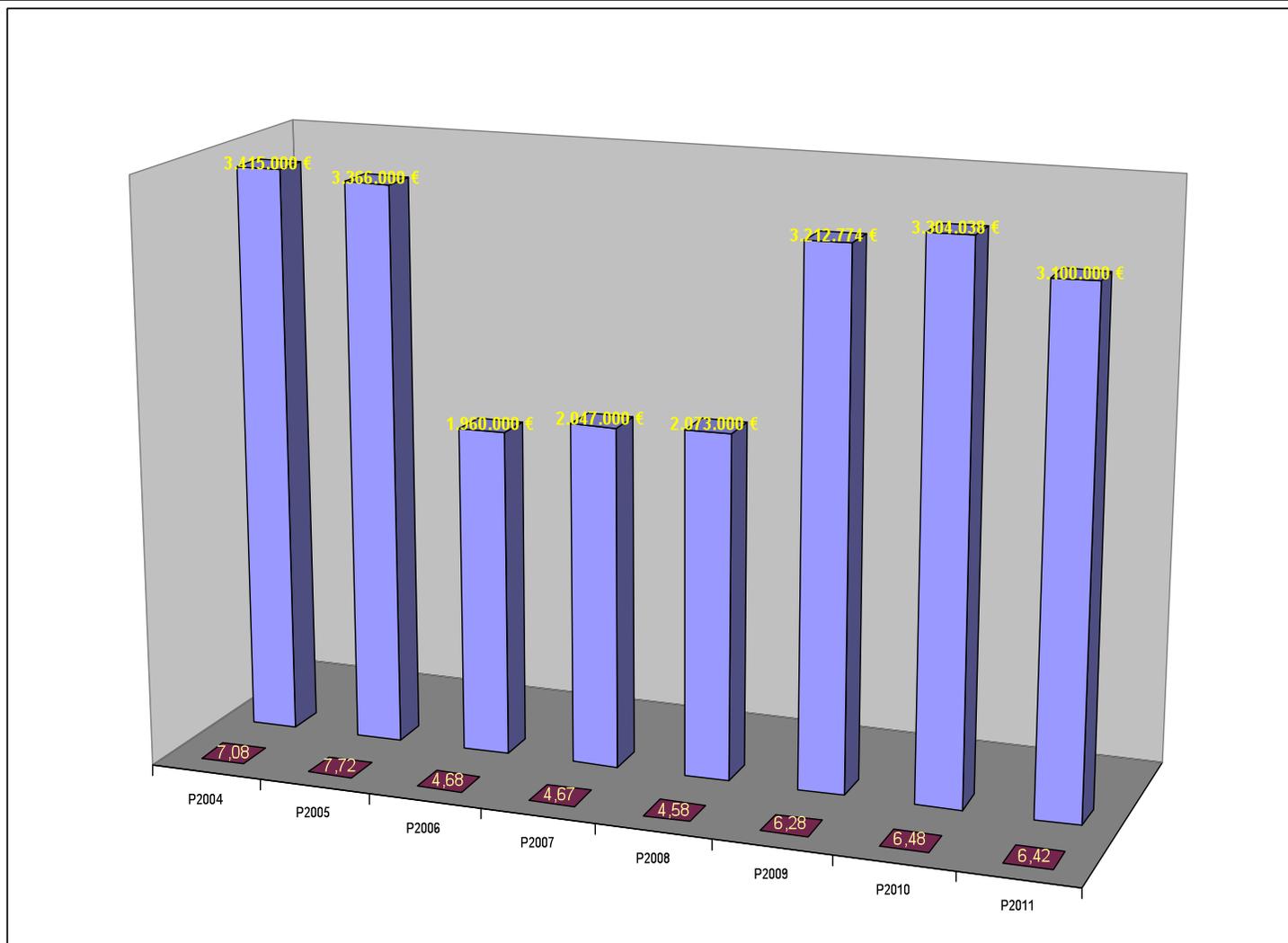
## 01 | Distribución por programas



## 01 | Evolución presupuestaria



# 01 | Evolución presupuestaria



## 02 | Acuerdos internacionales

- **Agencia de Energía Nuclear (OCDE):**
  - El CSN participa actualmente en 10 proyectos
  - Se ha renovado la participación en la base de datos de fallo de tuberías (antigua OPDE) y en la de sucesos de incendio (FIRE)
  - Renovación de la participación en la base de datos de fallos en modo común (ICDE) en curso
- **USNRC:**
  - Acuerdo general de colaboración en investigación
  - Participación del CSN en el programa CAMP
  - Participación en el proyecto ZIRP (“Zorita Internals Research Project”)

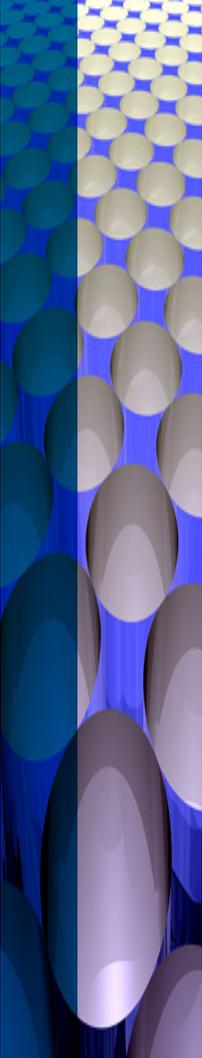
## 02 | Acuerdos internacionales

- Japan Atomic Energy Agency (JAEA):
  - El CSN, por acuerdo de ENUSA con las organizaciones japonesas, participó en el proyecto ALPS sobre seguridad del combustible
  - Se ha establecido un acuerdo con JAEA para participar en la segunda fase del proyecto ALPS-2: experimentos integrales de RIA y LOCA, oxidación a alta temperatura y dinámica de gases de fisión
  - Acuerdo específico con ENUSA para proporcionar combustible irradiado que será utilizado en el proyecto y para la transferencia de información

## 02 | Acuerdos nacionales

- Acuerdo con AEMET: ocurrencia de tornados en los emplazamientos de las IINN
  - Participación de ANAV
- Acuerdo con UPM-Caminos: rotura de vainas fragilizadas por hidruros por impactos de baja velocidad
  - Condiciones de transporte
  - Colaboración con ENUSA y ENRESA
  - Realizado benchmarking de ensayos de compresión diametral con Studsvik

## 02 | Acuerdos nacionales

- 
- Acuerdo con UPM-Industriales: propagación de incertidumbres en cálculos neutrónicos
    - Complemento a actividades ya en curso
  - Acuerdo con CIEMAT: corrosión bajo tensión del Inconel 690
    - Continuación de proyectos previos de investigación sobre este tema
    - Colaboración con UNESA
    - EPRI, que ya ha participado en las fases anteriores, ha mostrado interés por participar en este proyecto

## 02 | MELODI

- Iniciativa para coordinar la investigación europea sobre efectos de bajas dosis
  - 7º programa marco de la UE
  - De interés para el CSN y para las organizaciones españolas que trabajan en el tema
  - El CSN ha promovido la participación española en MELODI a través del Instituto de Biología Molecular Severo Ochoa
  - Creación de una plataforma nacional con las organizaciones interesadas, coordinado por el Instituto con el apoyo del CSN, que sirva para diseminar la información que se genere y para establecer las posturas de interés común

## 03 | Perspectivas

- Efectos de la reducción presupuestaria prevista
  - El objetivo es mantener la actividad de investigación del CSN en los niveles actuales
  - Necesidad de realizar una priorización más estricta de los nuevos proyectos
  - Incrementar la colaboración con otras organizaciones para reducir costes
  - No es previsible que se pueda realizar una convocatoria de concesión de subvenciones en el futuro próximo

## 03 | Nuevos proyectos

- Iniciativas del CEIDEN:
  - El CSN participa activamente en CEIDEN: ensayos con los internos de Zorita, proyectos de combustible, grupo de trabajo sobre combustible dañado
  - Nuevo proyecto para el estudio del envejecimiento del hormigón
  - Participación en el proyecto de extensión de vida de los contenedores de combustible gastado coordinado por EPRI
  - Interés del CSN por las actividades relacionadas con formación que realiza CEIDEN



## 03 | Nuevos proyectos

- Otras actividades en estudio relacionadas con el comportamiento de materiales
  - Envejecimiento del material de la vasija, en colaboración con la NRC
  - Comportamiento del liner de la contención y de las piscinas de almacenamiento (interés de EPRI)
- Envejecimiento de cables
  - Continuación de proyectos anteriores realizados en colaboración con UNESA
  - Actualmente en elaboración la memoria técnica del proyecto junto a UNESA

## 03 | Nuevos proyectos

- Protección del paciente:
  - Iniciativas identificadas durante 2010
  - Puesta en marcha de los proyectos prevista para 2011
- Proyectos relacionados con MELODI:
  - En general, los proyectos de I+D financiados por la UE no lo son en su totalidad
  - Apoyo a los proyectos propuestos por organizaciones españolas que sean aceptados para su realización y que caigan dentro del campo de interés del CSN

## 03 | Gestión interna

- Aspectos identificados de mejora:
  - Valoración inicial de los proyectos
  - Puesta en valor interna de los beneficios de los proyectos
  - Visibilidad interna y externa de los resultados
- Informatización de la gestión:
  - Finalizada la primera fase (interna)
  - Conexión con el registro general durante 2011
  - Automatización del traslado de la información al apartado correspondiente de la web externa, incluyendo los resultados no confidenciales

# **Investigations in support of fuel safety and reliability**

**Carlo Vitanza**

*Head of Research and Development. Halden Reactor Project*

## **ÍNDICE**

**RIA investigations**

**LOCA investigations**

**Investigations for Development of New Cladding**

**Few words about Halden**

# Investigations in support of fuel safety and reliability

Carlo Vitanza  
OECD Halden Reactor Project  
carlo.vitanza@hrp.no

*Jornada de I+D 2011, Madrid, 3 March 2011*



# Contents

- RIA investigations:
  - Main source of data
  - Status and results
- LOCA investigations:
  - Main source of data
  - Status and results
- Assessment of new fuel claddings (tests at Halden)
  - Power ramps
  - Rod overpressure criterion, Halden database
  - Cladding corrosion: Advanced cladding materials studied in aggressive thermal-hydraulic and water chemistry conditions
- Few words about Halden



# RIA Investigations

## Main motivation: Account for extended burn-up

- RIA criterion: **Maintain coolable geometry** (no fuel rod disintegration/dispersal)
- Fuel failure occurs before any loss of coolability. Avoiding fuel failure ensures coolability, hence in most countries the fuel failure limit is used as a conservative RIA (coolability) limit
- Some organizations (EPRI, J-NSC) have in the past proposed both a fuel failure limit and a coolability limit, but this distinction - today - is a lost cause
- New RIA criteria: Burn-up and cladding corrosion are the most important variables affecting the safety limit



## RIA Source of Data

### □ NSRR, JAEA, Japan

- BWR and PWR fuel, mostly at cold conditions
- Zr-2, Zr-4 and advanced PWR cladding
- UO<sub>2</sub> and MOX fuel

### □ CABRI, IRSN, France

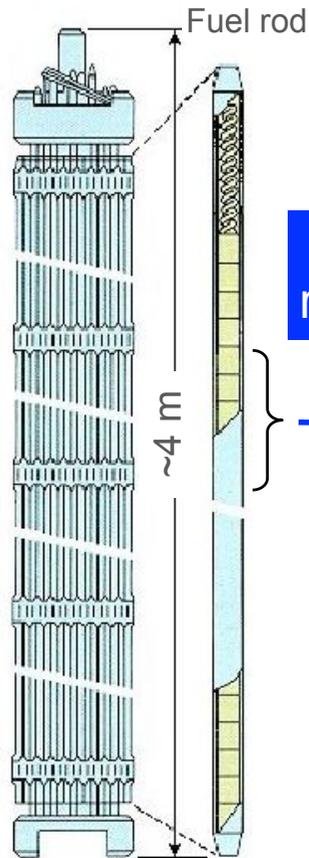
- PWR fuel, hot conditions
- Zr-4, advanced PWR cladding (M5 and Zirlo)
- UO<sub>2</sub> and MOX fuel

### □ [BIGR and IGR, Russia (only for ductile failures)]

- VVER UO<sub>2</sub> fuel



# NSRR RIA experiments

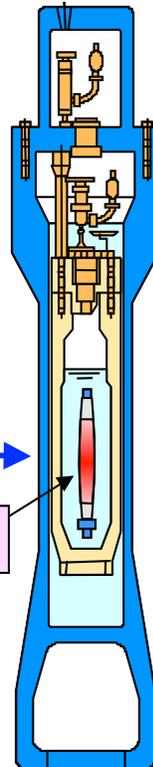


Fuel rod used in a power reactor

Instrumentation and capsule assembling

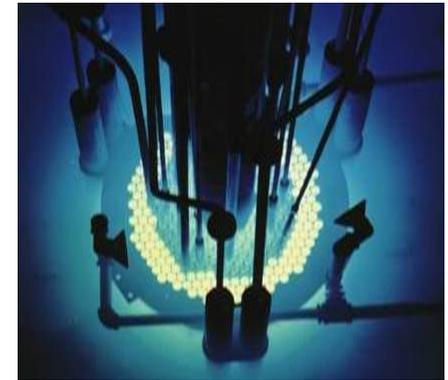
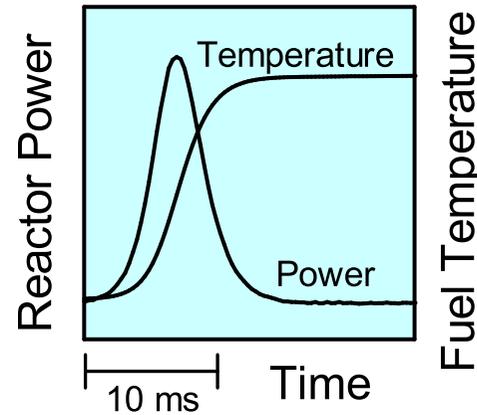
Cutting and refabrication

Test fuel rod  
Pellet stack  
~110 mm



Test capsule

Pulse irradiation



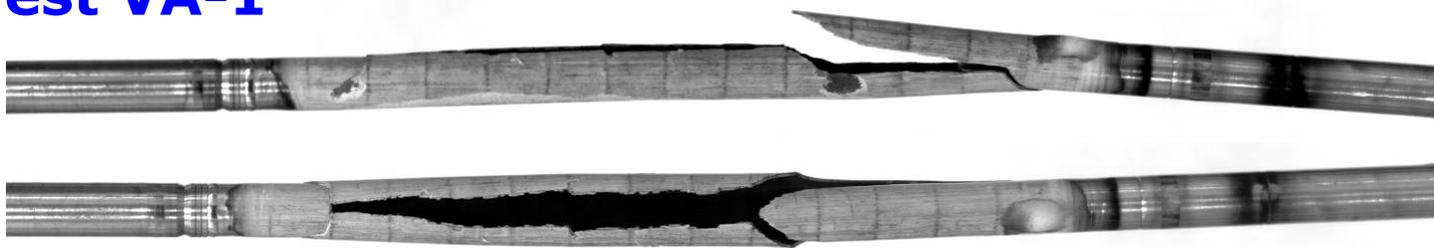
Transient measurement

- Temp. at clad surface and coolant
- Rod pressure, capsule pressure
- Clad surface strain (hoop, axial)
- Elongations of clad and pellet stack
- Water column velocity
- etc.

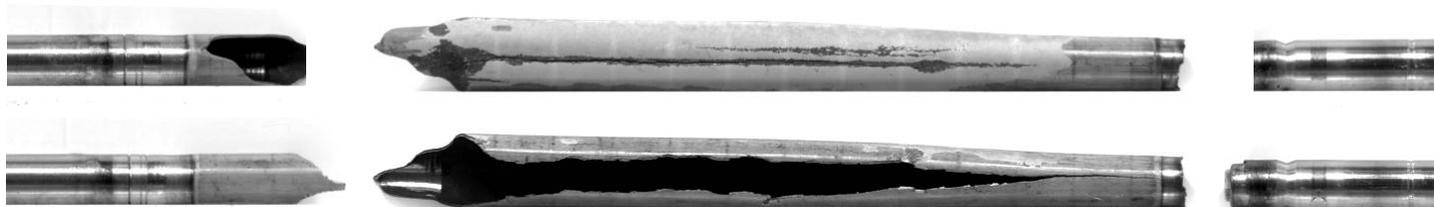
Detailed post irradiation examinations at RFEF

## Post-test appearances of failed rods

### Test VA-1



### Test VA-2



Top

Bottom

## NSRR experiment

- ✓ A crack propagated all over the fuel active (pellet stack) region, and all of pellets were lost from the rods.

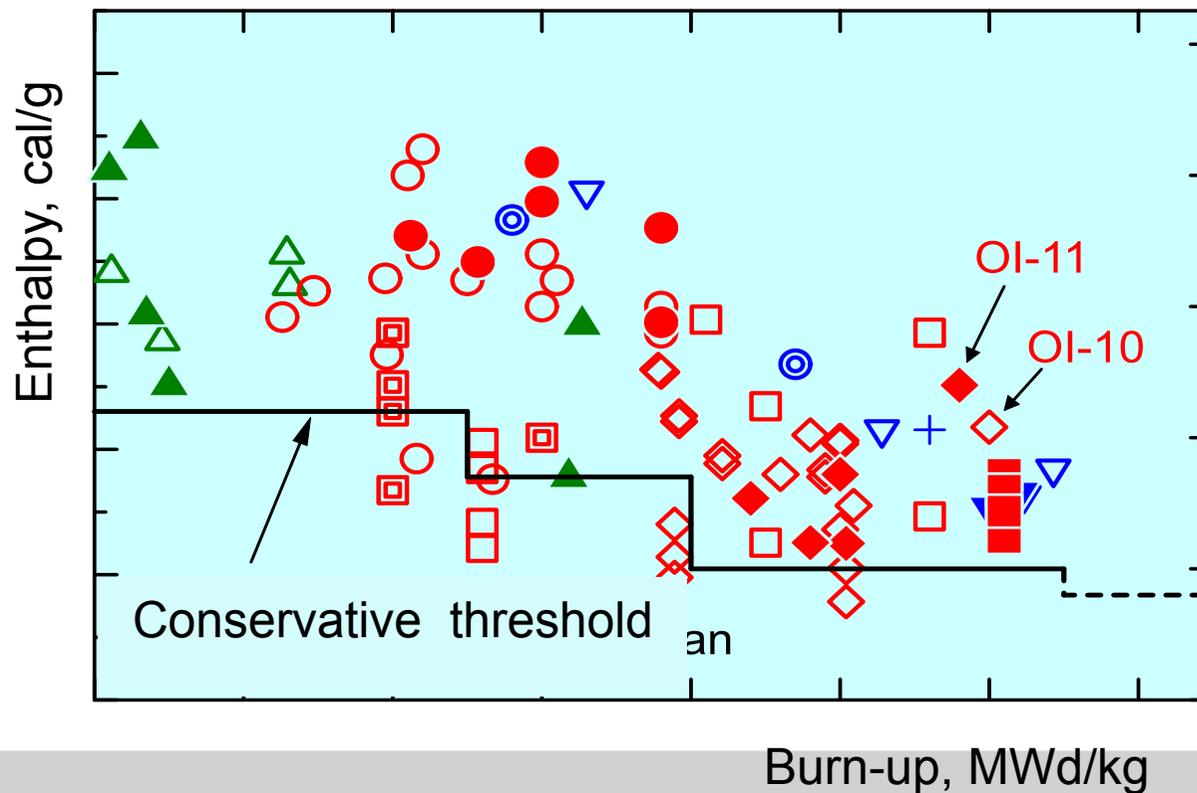
## RIA Database

- ❑ Burn-up to ~80MWd/kg
- ❑ Corrosion up to ~80  $\mu\text{m}$  (oxide thickness)
- ❑ All tests at cold or hot zero initial power
- ❑ Fuel enthalpy accuracy: better than  $\pm 5$  cal/g
- ❑ About 100 data altogether
- ❑ ~25-30% failures, 70-75% sound



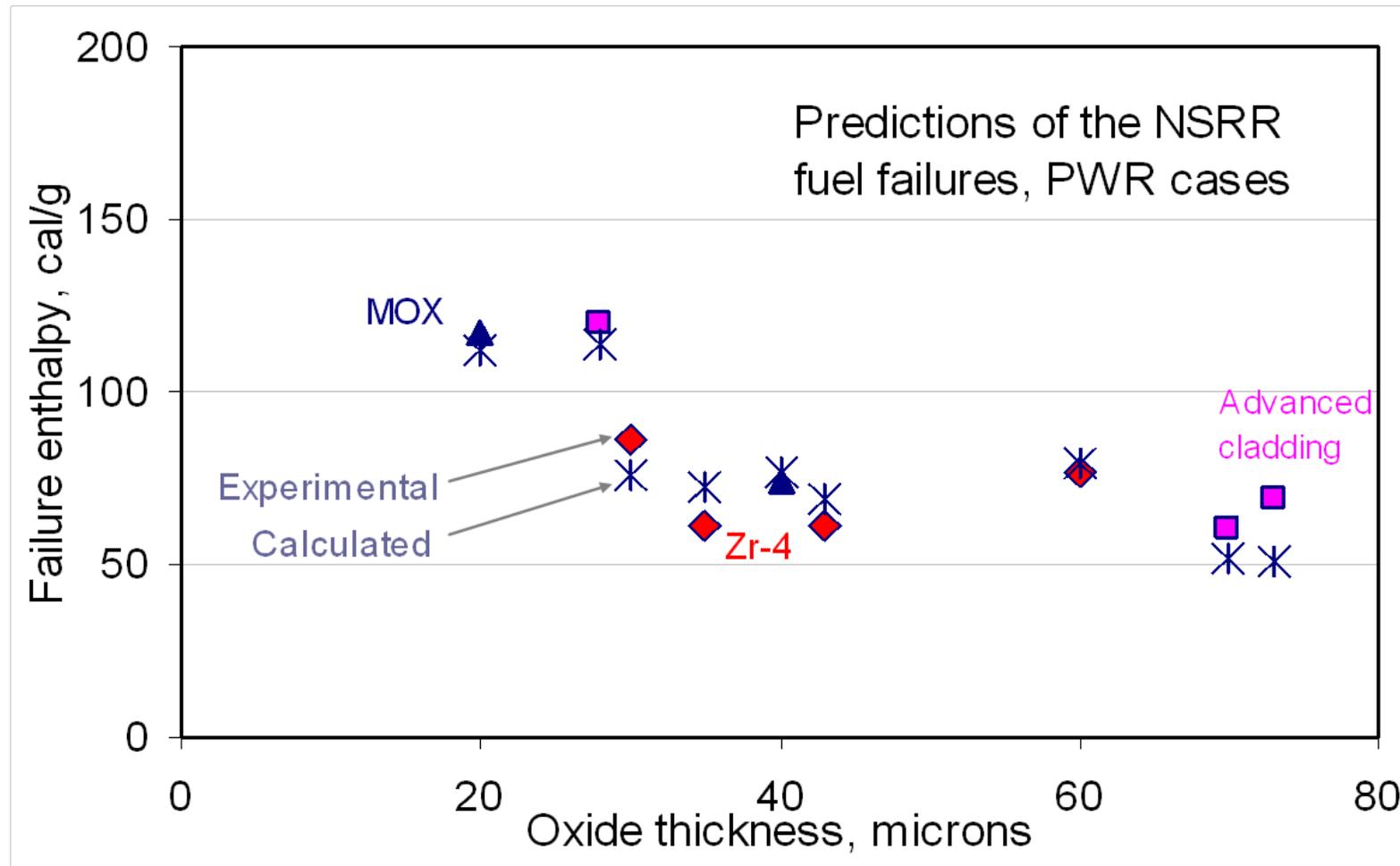
# Case of conservative thresholds

Test ID		No failure	Failure	Test ID	No failure	Failure
NSRR	PWR	◇	◆	SPERT, PBF	△	▲
	BWR	□	■	CABRI UO <sub>2</sub>	▽	▼
	ATR/MOX	◻	—	CABRI MOX	⊙	+
	JMTR	○	●	—	—	—



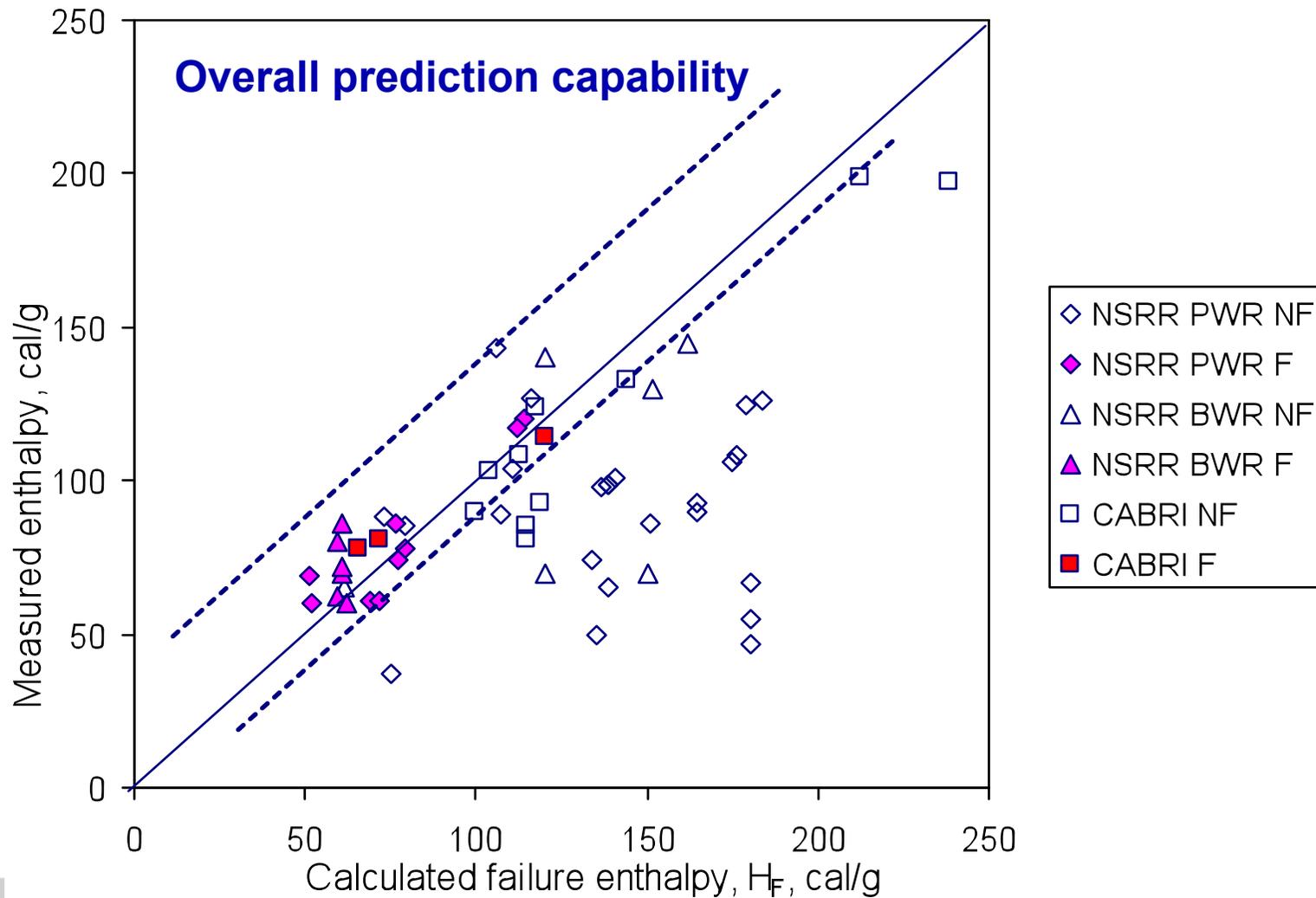
## Case of best estimate threshold

$$H_F = \left[ 200 \cdot \frac{25 + 10D}{Bu} + 0.3\Delta\tau \right] \left( 1 - \frac{0.85OX}{W} \right)^2 - H_o$$



# Case of best estimate threshold

$$H_F = \left[ 200 \cdot \frac{25 + 10D}{Bu} + 0.3\Delta\tau \right] \left( 1 - \frac{0.85OX}{W} \right)^2 - H_0$$



## LOCA Investigations

### LOCA Criterion

- As stated in the US code of Federal Regulations issued in 1971, “the cladding temperature transient is terminated at a time when the core geometry is still amenable to cooling, and before the cladding is embrittled so as to fall during or after quenching”. The US Atomic Energy Commission stated their “belief that retention of ductility in the zircaloy is the best guarantee of its remaining intact during the hypothetical LOCA” [Atomic Energy Commission Rule-making Hearing, Opinion of the Commission, Docket RM50-1, 1973]
- In Japan, the principle is that a coolable geometry is maintained if the fuel rod does not fail during quenching. Hence integral rod tests are carried out to simulate the real rod behaviour in the best possible manner, including the presence of axial constraint



# LOCA

1. In a LOCA, the cladding temperature increases due to heat-up by fuel decay heat and lack of cooling
2. At high temperatures ( $\sim 900^{\circ}\text{C}$  or higher) and in presence of steam, the cladding becomes heavily oxidized within minutes
3. Because of the heavy oxidation and hydrogen pick-up, the cladding may lose ductility and become brittle
4. **The embrittled cladding shall**

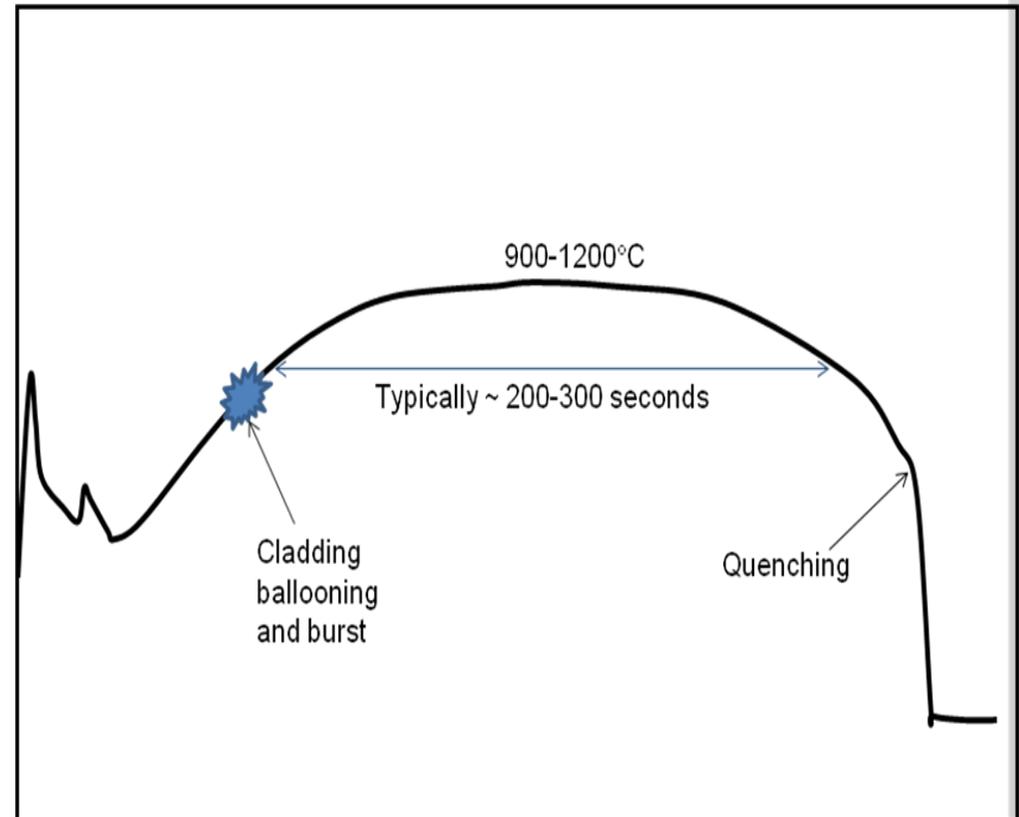
**NOT**

be degraded to the "zero ductility" limit

**NRC criterion**

be breaking during the quench phase

**JAEA criterion**



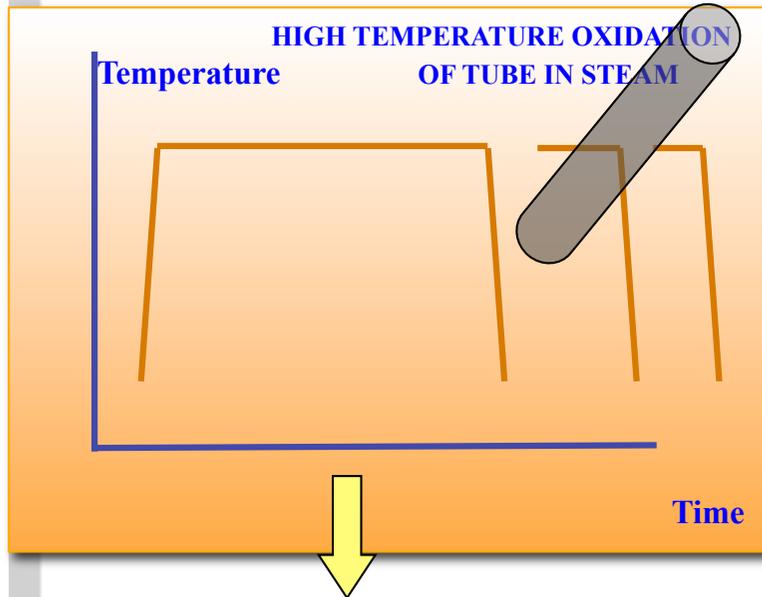
## LOCA, source of data

- Two criteria → two test methods out-of-pile:
  - 1) NRC at ANL (& Studsvik) labs:  
Two-side steam oxidation + ring compression  
Criterion: “zero” ductility
  - 2) JAEA integral quench tests  
Heat-up, burst and quench test (with axial constraint)  
Criterion: rod fracturing
- Halden is the only source of in-pile LOCA tests worldwide. These tests are carried out with commercial fuel segments

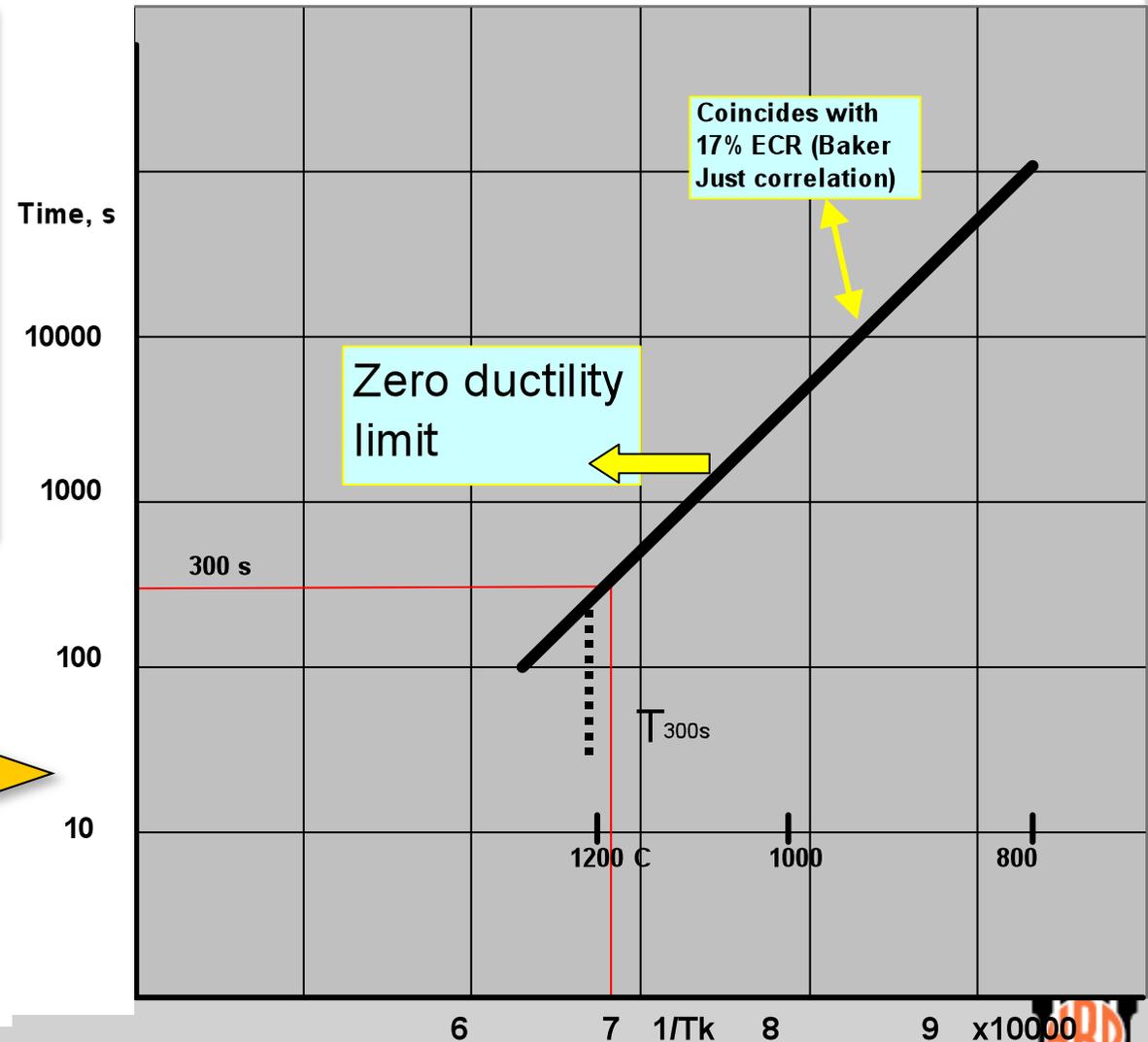
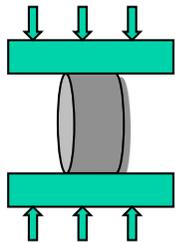


# METHOD 1: NRC at ANL: Empty tube, two-side oxidation and ductility testing by ring compression

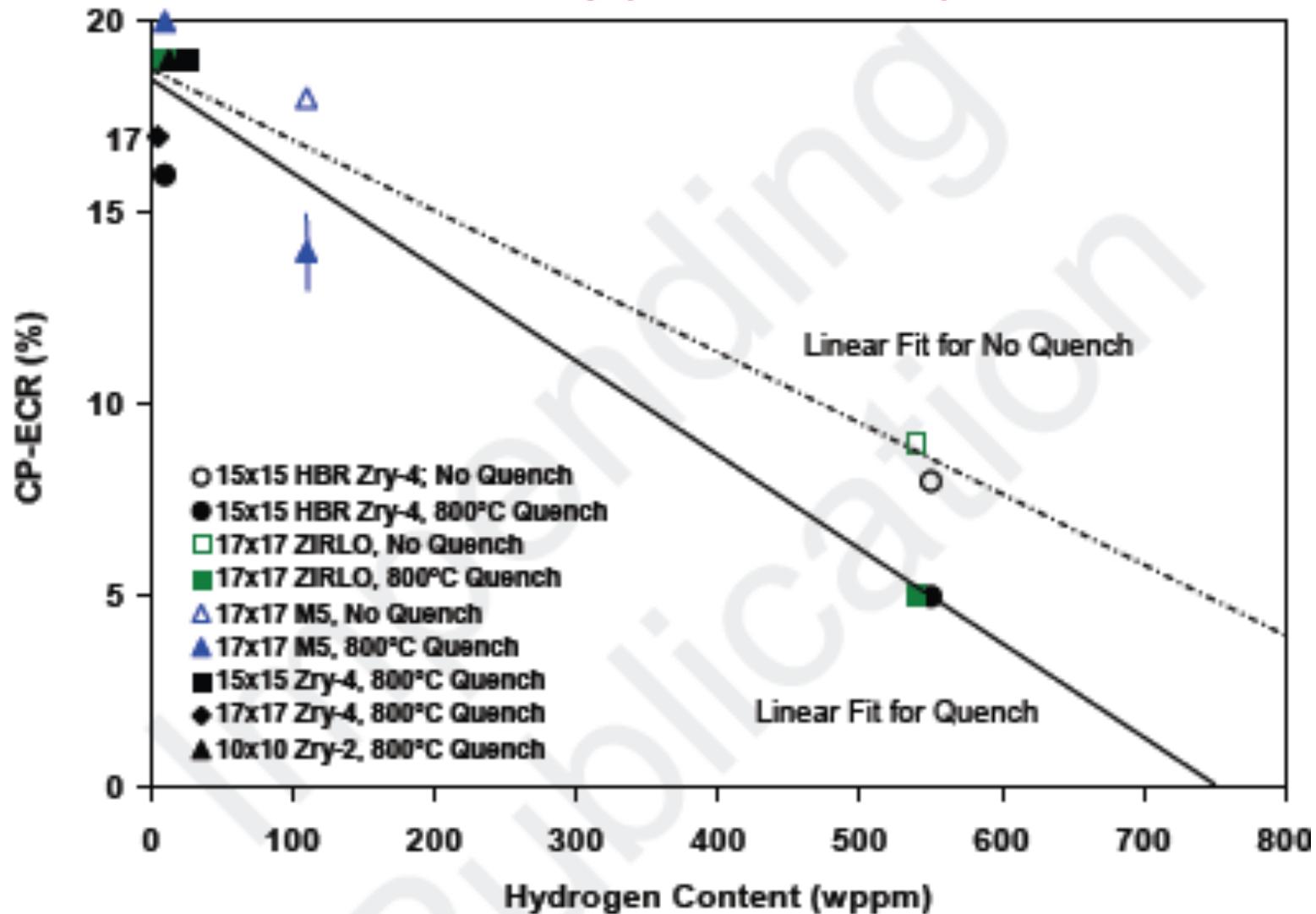
Zero-ductility threshold (Zr-4, 0.686mm thick)



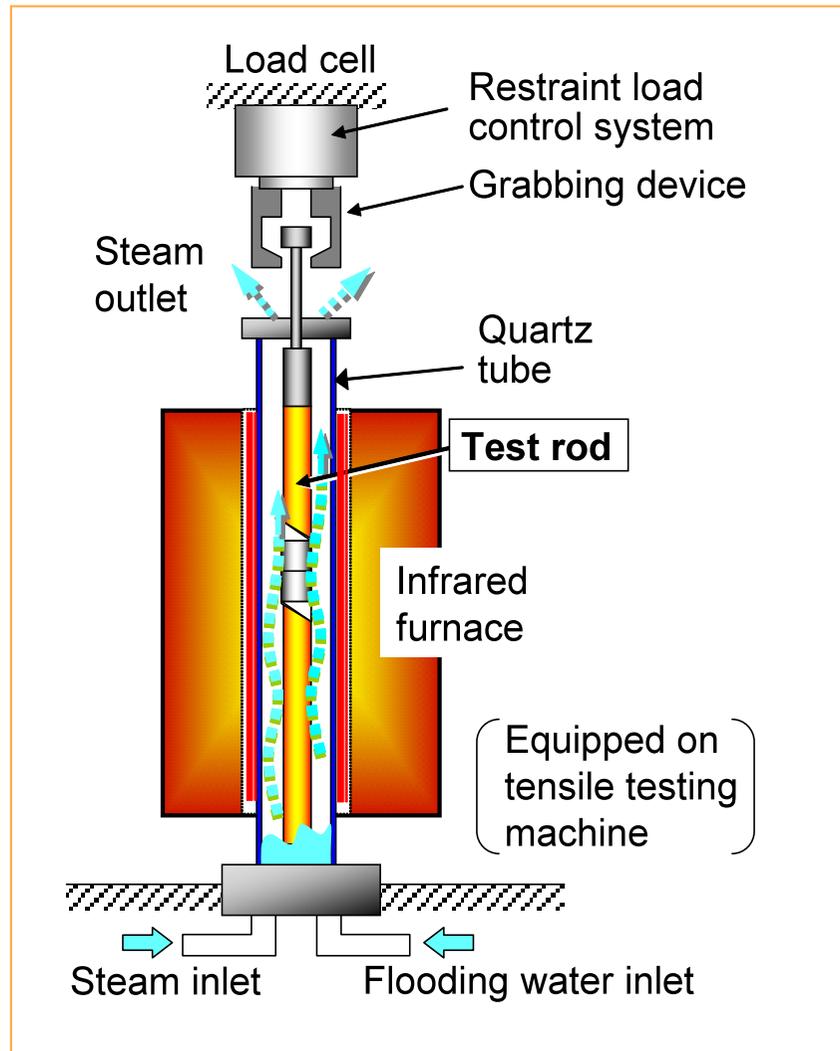
RING COMPRESSION TEST



**METHOD 1 - NRC- ANL ductility tests outcome :**  
**The ECR limit is strongly reduced by the H-content**

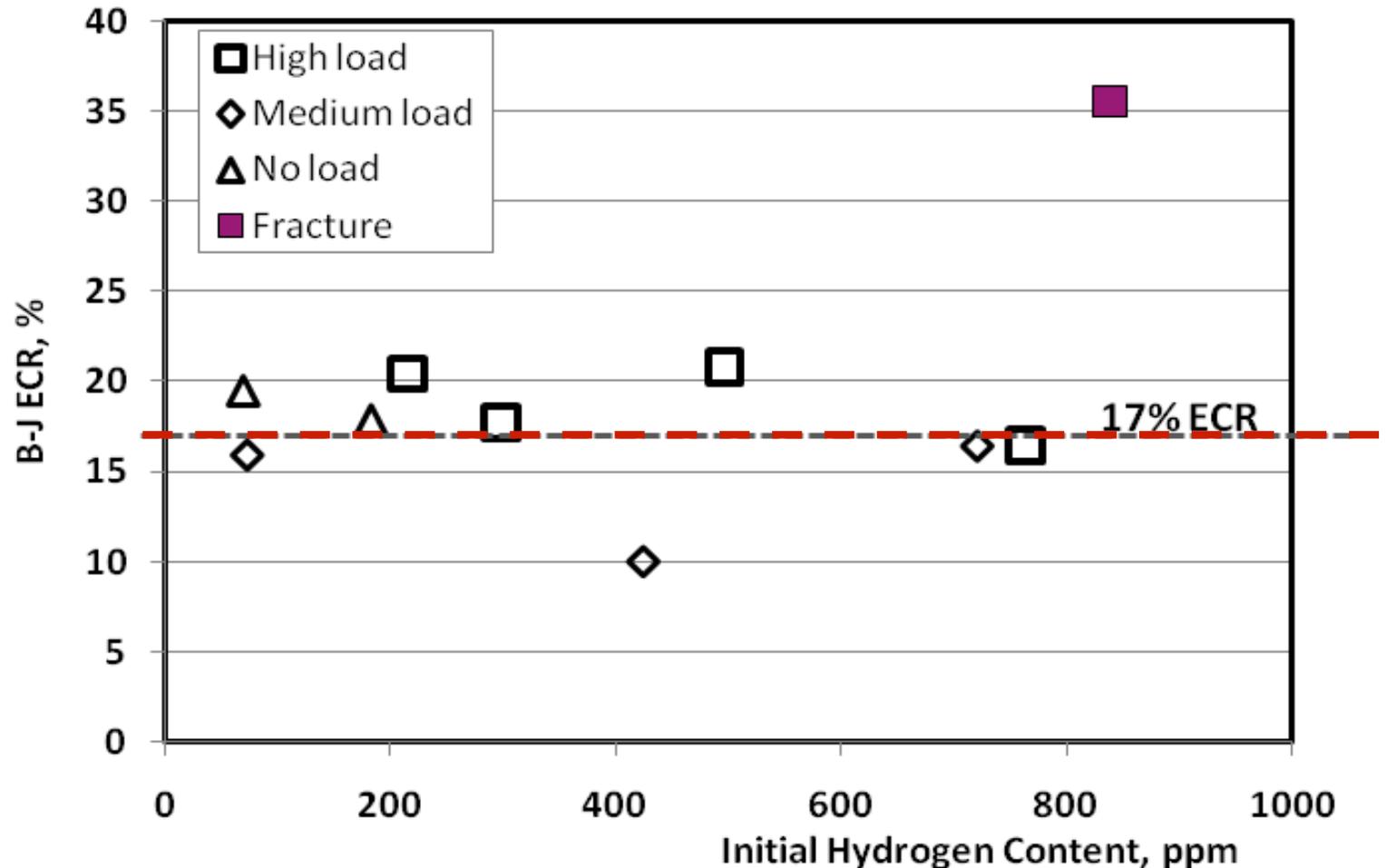


## METHOD 2: JAEA integral quench test equipment



## METHOD 2: JAEA Integral quench test outcome: The 17% ECR limit is unaffected by the H-content

(This is opposite to the zero ductility tests outcome - see slide 15)



# Halden Loss of Coolant Studies

The Halden reactor test series focuses on in-reactor effects that are different from those obtained in out-of-reactor tests. In particular, the heating from within the fuel rod, in contrast to the external heating of out-of-pile setups, may affect a number of phenomena.

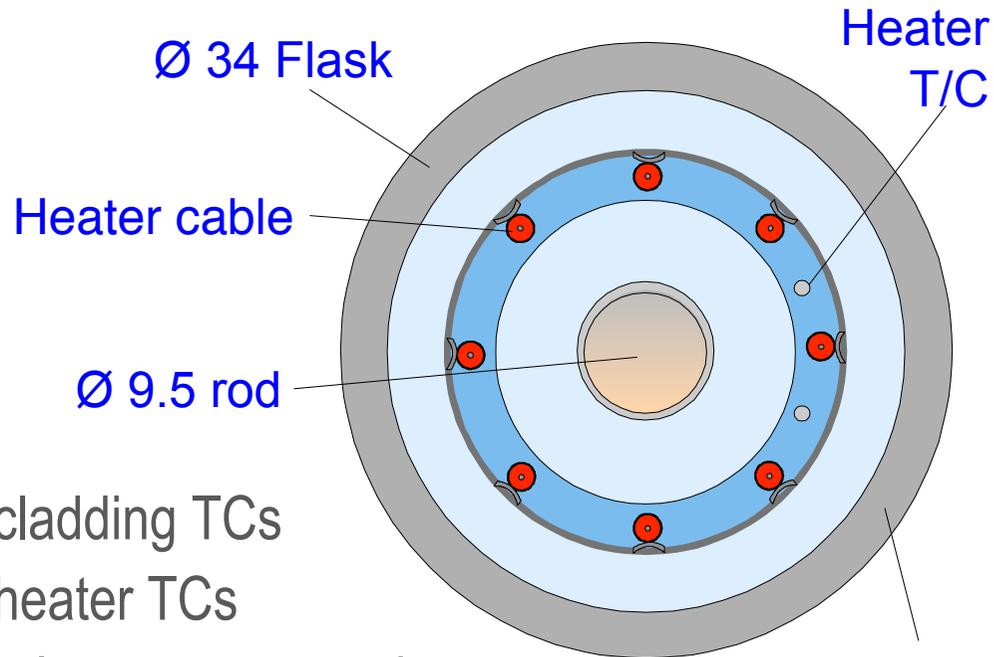
Primary objectives:

- Measure the extent of fuel (fragment) relocation into the ballooned region and evaluate its possible effect on cladding temperature and oxidation
- Investigate the extent (if any) of "secondary transient hydriding" of the cladding above and below the burst region



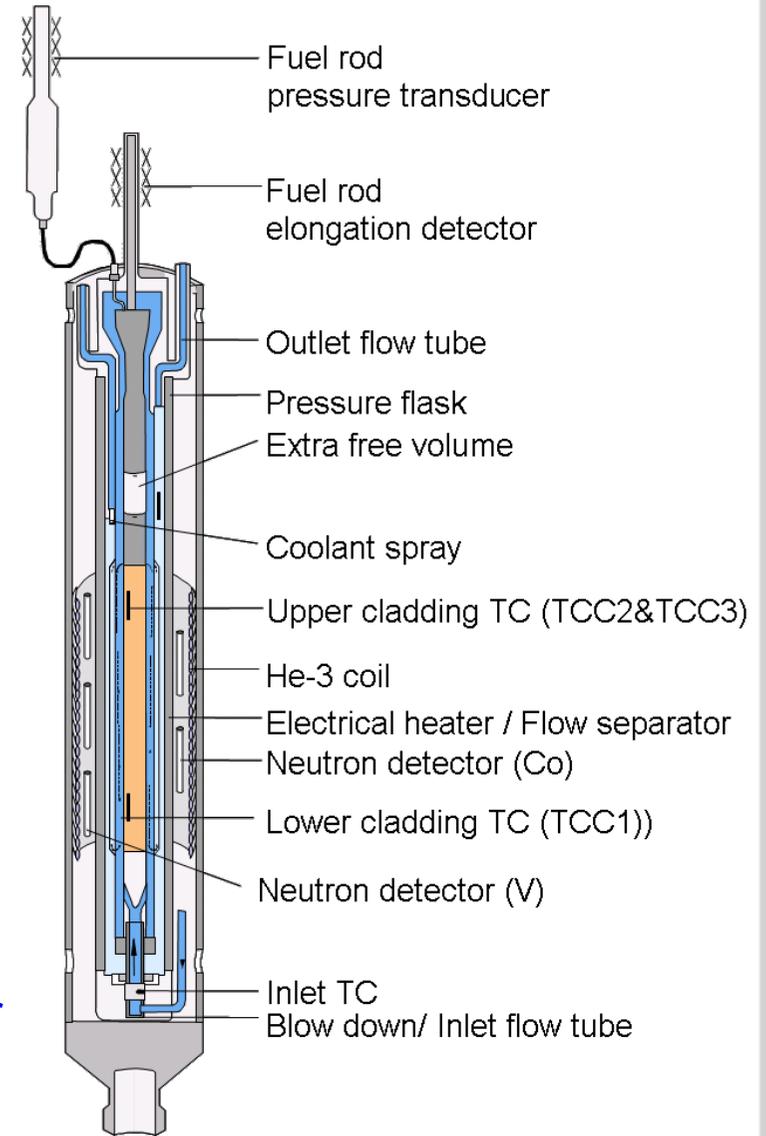
# Halden LOCA rig: IFA-650 Features

- Single rod experiment using high burnup fuel
- Heating provided from within the rod by low level of nuclear power simulating decay heat



- 3 cladding TCs
- 3 heater TCs
- Fuel pressure transducer
- Cladding elongation detector

Ø 26.5 /  
Ø 20 heater



## Overview of executed and planned LOCA tests

	type	burnup MWd/kg	clad	treat- ment	oxide µm	PCT °C	pres. bar	when
1	PWR	0	commissioning test			1100	1	< 2007
2	PWR	0	commissioning test			850	40	-
3	PWR	82	Zry-4	SRA	24-27	850	40	-
4	PWR	92	Zry-4	SRA	10-11	850	40	-
5	PWR	83	Zry-4	SRA	65-80	1100	40	< 2007
6	VVER	55	E110		~5	850	30	4/2007
7	BWR	44	LK3/L		<10	1150	6	4/2008
8	PWR	0	commissioning test			1100	1	12/2008
9	PWR	90	Zry-4	SRA	7-8	1100	40	4/2009
10	PWR	61	Zry-4	SRA	20-30	850	40	5/2010
11	VVER	55	E110			1000	30	10/2010
12	BWR	72	LK3/L			<800	low	2011
13	BWR	72	LK3/L			<800	low	2012



# Test #9 – high burnup PWR fuel Repeat of Test #4

## IFA-650.4:

### Gamma scanning

Right:

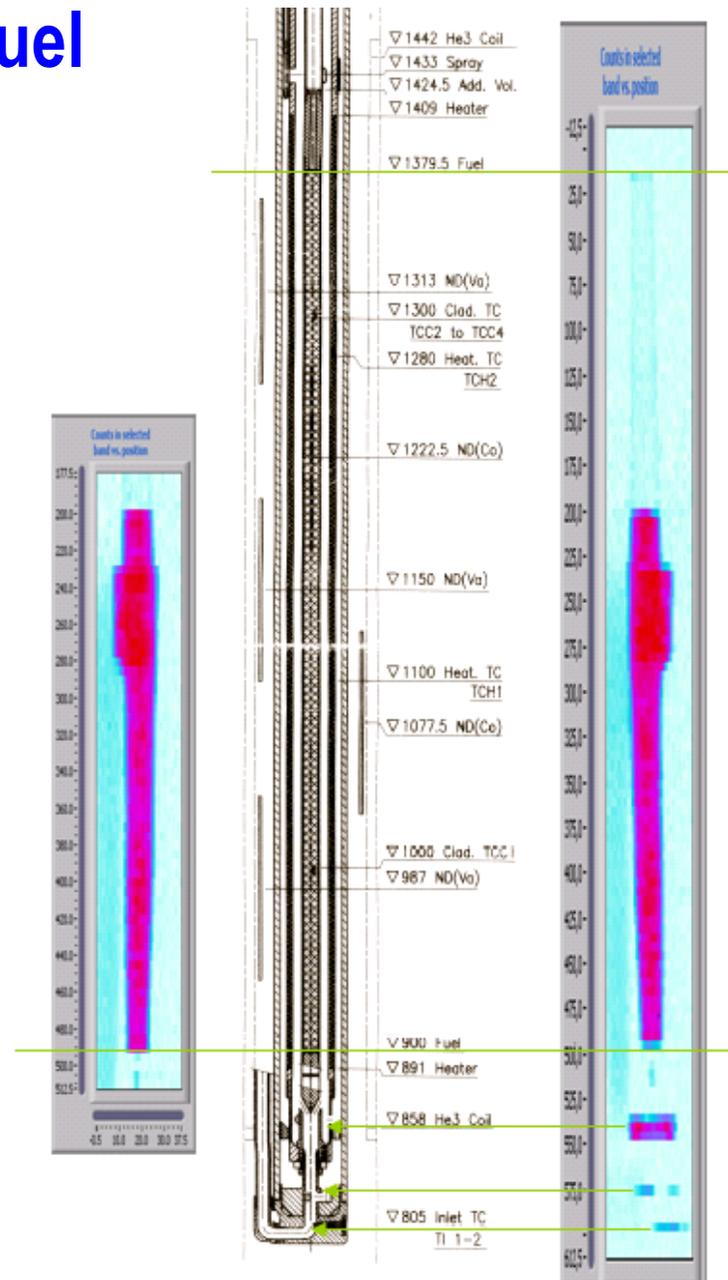
- Full rod scan + flask bottom
  - No fuel at top of rod
  - Fuel at bottom of flask

Left:

- Flask rotated 90° clockwise
  - Only ballooned area scanned

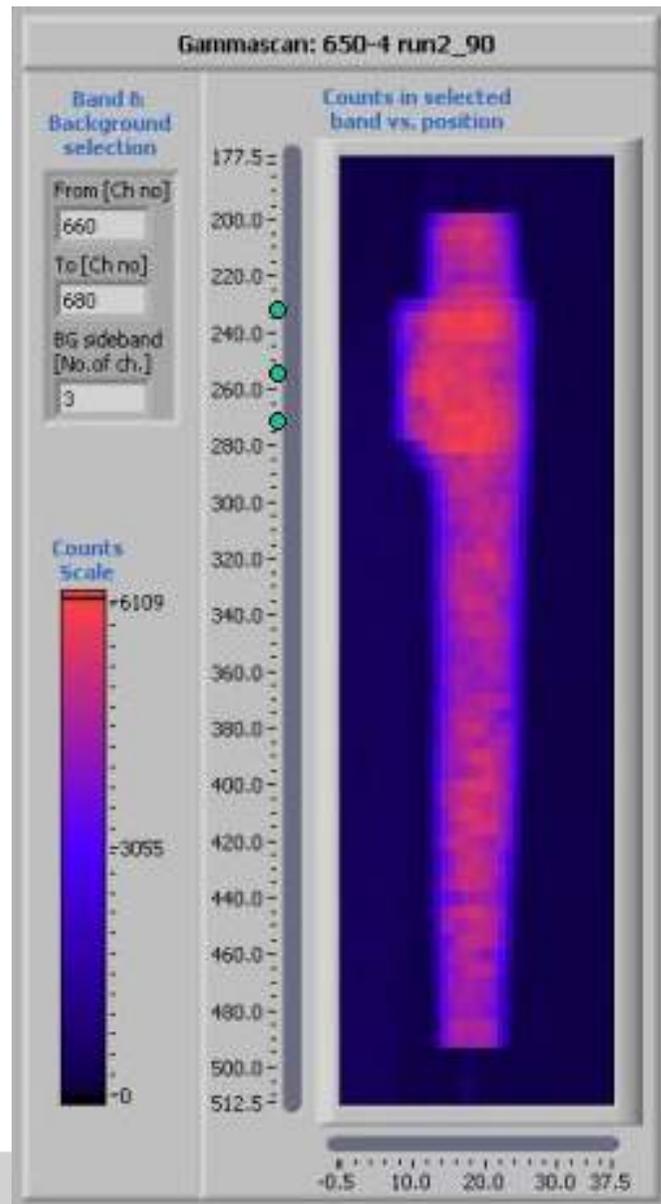
Middle:

- Rod schematic with instrument levels

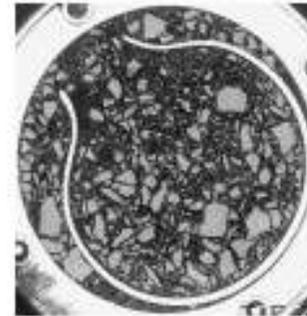




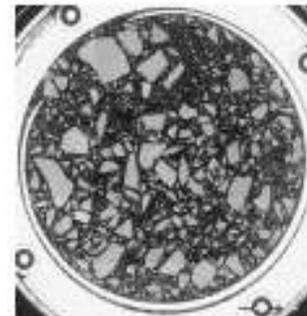
# Halden LOCA testing



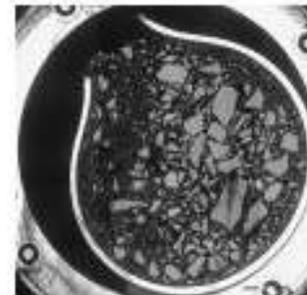
## Balloon zone (200-280mm)



235mm



255mm



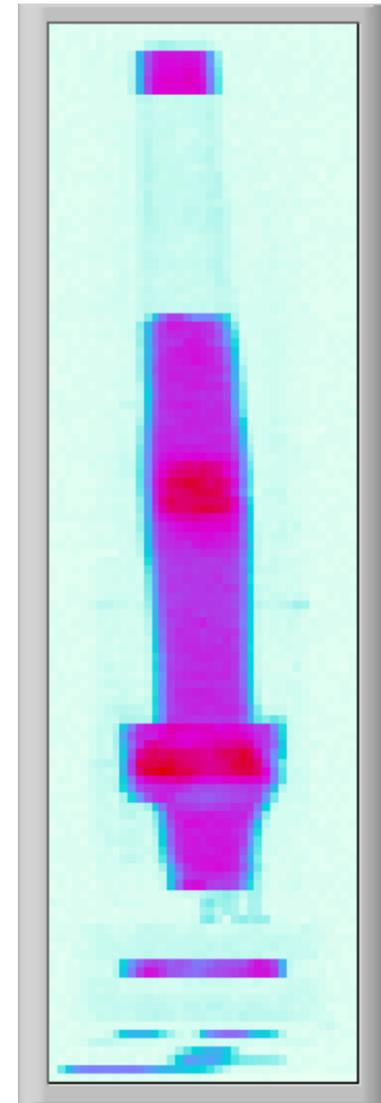
275mm

*Considerable fuel fragmentation and relocation*



## Test #9 – high burnup PWR fuel

- LOCA test with high burnup fuel (90 MWd/kgU) aiming at repeating the fuel relocation observed in test #4
- Peak clad temp. 1100 °C
- Very similar outcome:
  - well developed balloon filled with fuel fragment
  - part of fuel stack missing
  - some fuel at the bottom of the pressure flask



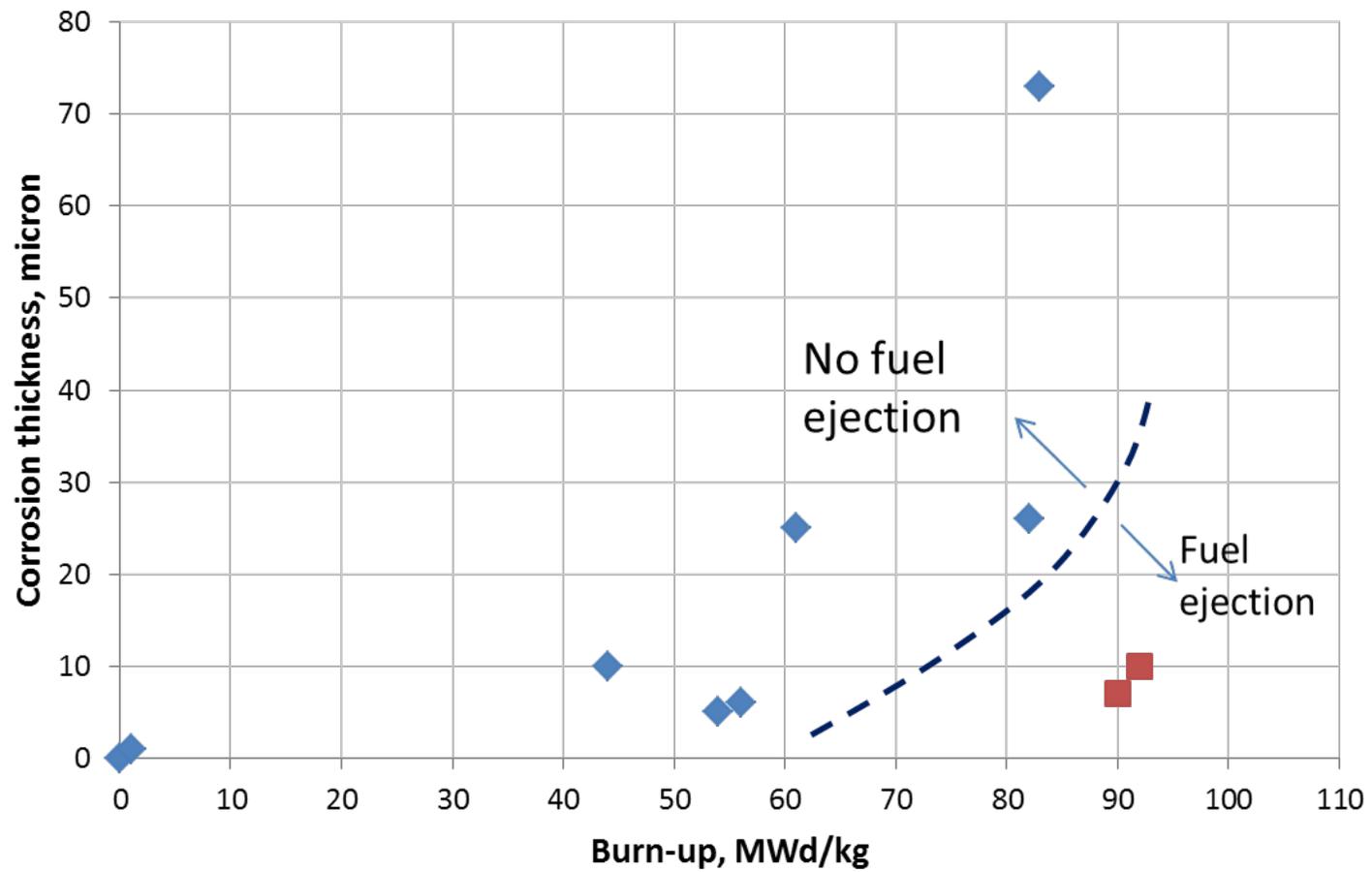
## Outcome of the Halden LOCA in-pile tests:

- 1) Under some conditions, the fuel may fragment, relocate and be ejected out of the fuel rod upon ballooning and burst, i.e. fuel coolability problems may arise well before the cladding starts oxidising
- 2) Under which conditions can this occur?



# Halden LOCA tests

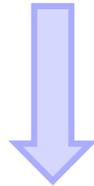
## Fuel ejection vs. no-ejection data



# Investigations for Development of New Cladding

## □ Base irradiation:

- Lead Test Assemblies in NPP
- Long-term irradiation in Halden loops

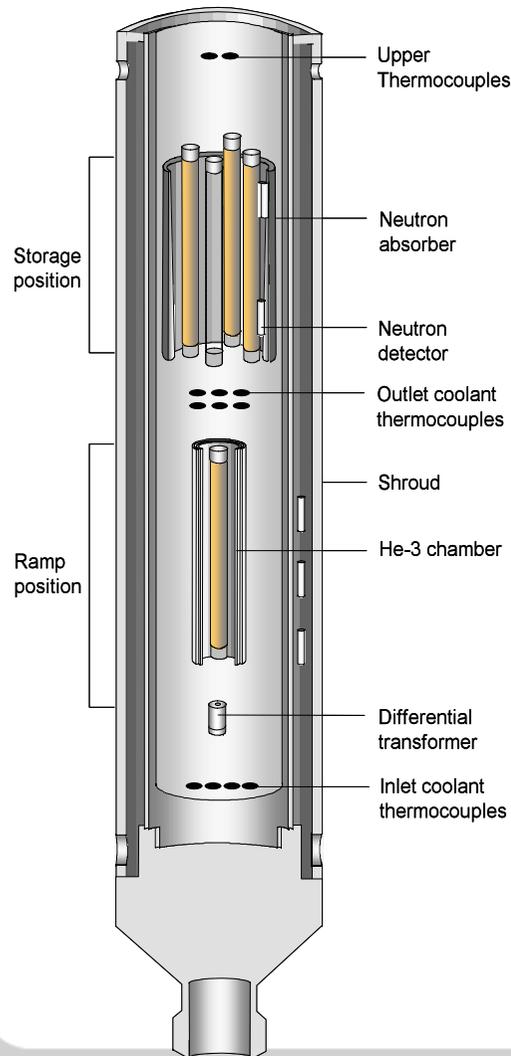


## □ Specialized tests at Halden:

- Power ramps
- Rod lift-off/ overpressure tests
- Corrosion tests in specific WC conditions
- Others (e.g. creep, hydride effects, LOCA etc)

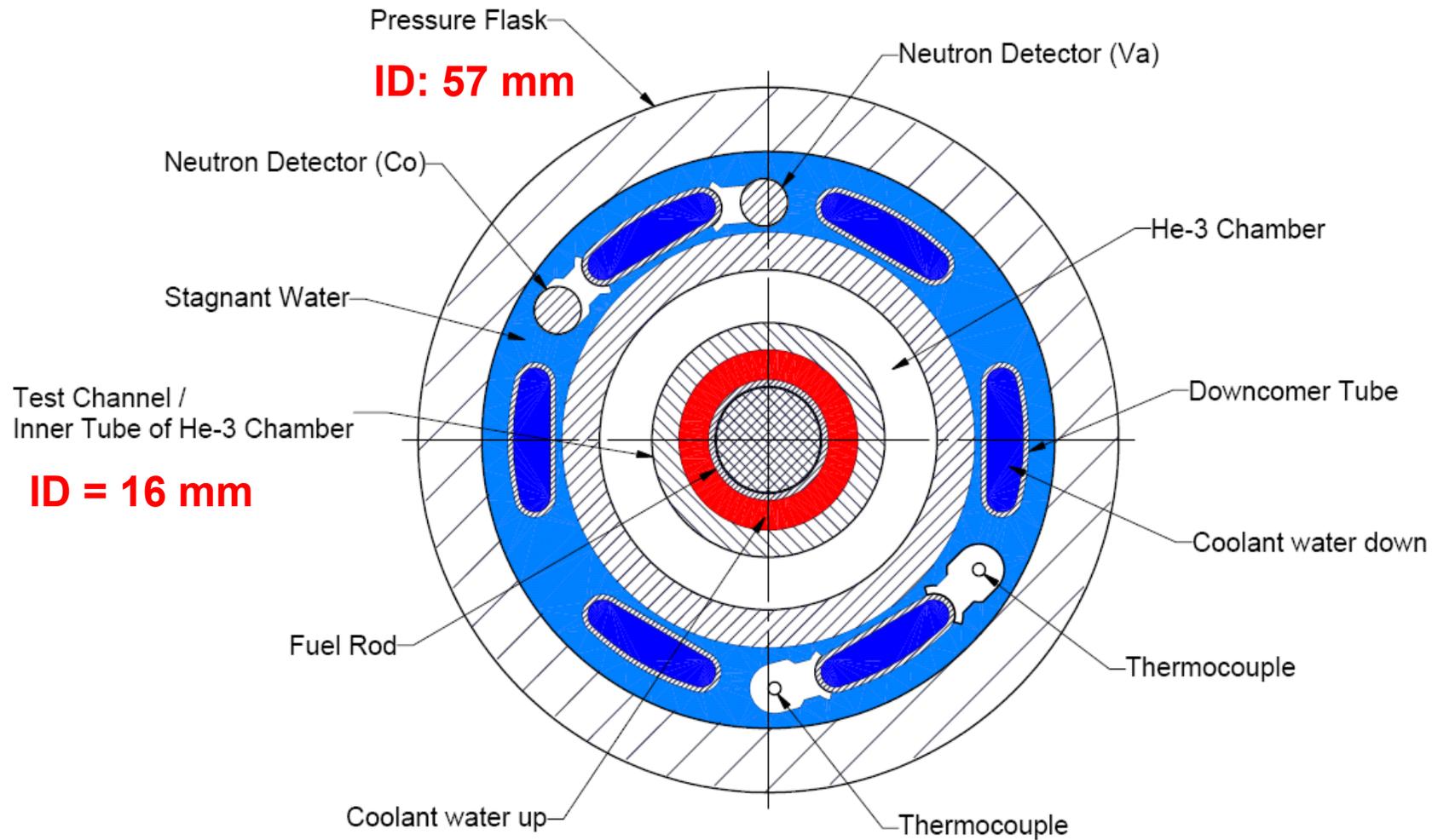


# New cladding assessment: Power ramps at Halden



- Test channel” in high-flux region of reactor core
- Four fuel rod storage positions in low-flux region at the upper part (shielded by a neutron absorber)
- Hydraulic system for moving fuel rods (one at a time) from storage position to ramp position
- Helium-3 chamber surrounding fuel rod ramp position providing:
  - local power control (power level and ramp rate)
  - insulation for reducing power uncertainties
- The ramp rig contains instrumentation for TH assessment and failure detection
- Source term (in case of rod failure)

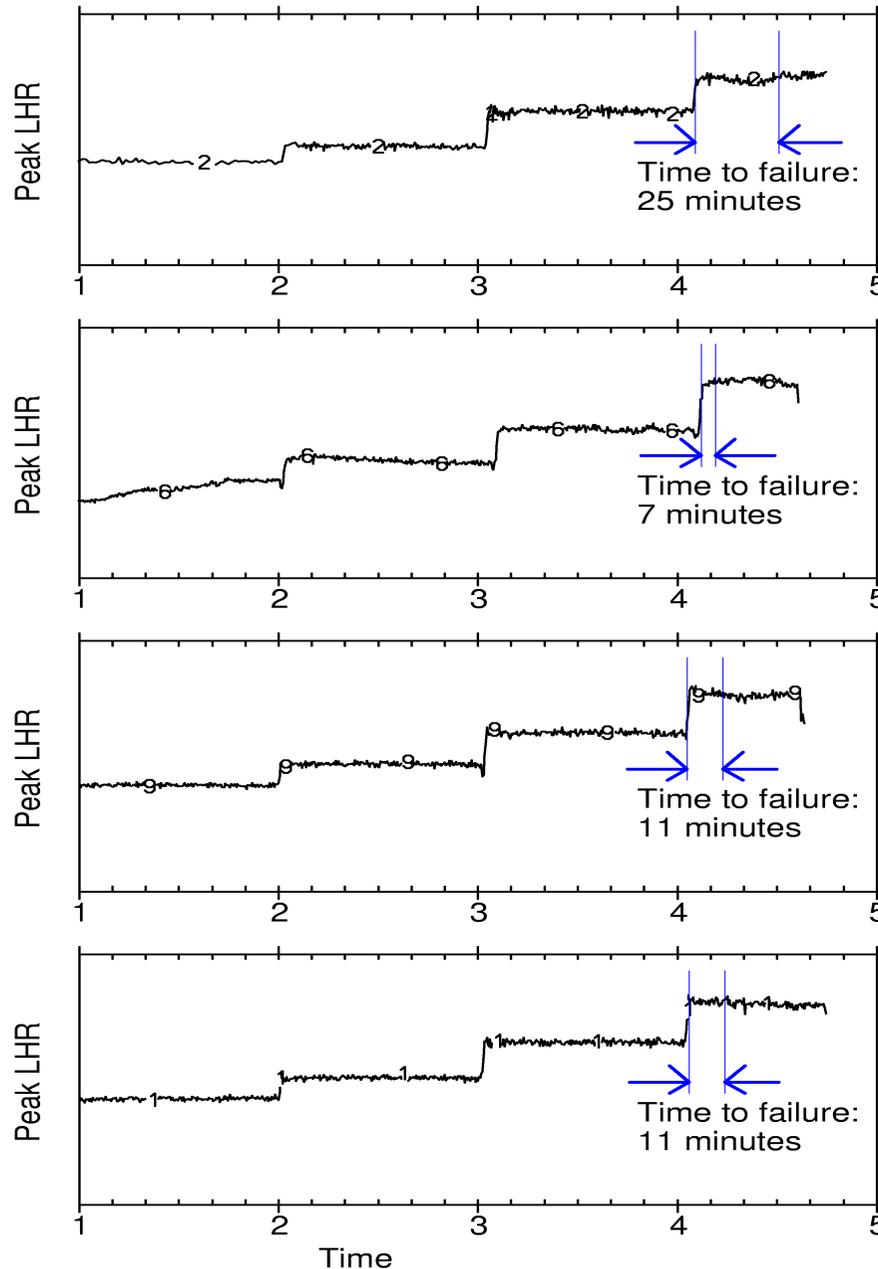
# Cross-section of fuel rod ramp position



# Main ramp rig specifications

- Number fuel rods in ramp rig : 4
- Maximum length of fuel rods : 500 mm
- Ramping factor : >3
- Ramp rate : 100 W/cm min (typical)
- Coolant conditions : BWR / PWR / CANDU
- **Coolant flow velocity :** ~ 5 – 7 m/s
- Cladding elongation detector : In ramp position
- Coolant thermocouples : 16
- Neutron detectors (Cobalt) : 2
- Neutron detectors (Vanadium) : 5
- **Power in parking position:** **Much reduced from previous rig**  
- Hence high precision gamma scanning
- Calorimetric power measured on-line





## Past experience: Repeatability

### Test-1: 1 STD rod, 2 additive fuel rods

- The STD rod failed after 25 minutes
- The two additive fuel rods survived

### Test-2: 1 STD rod, 2 additive fuel rods

- The STD rod failed after 7 minutes
- The two additive fuel rods survived

### Test-3: 1 STD rod, 2 additive fuel rods

- The STD rod failed after 11 minutes
- The two additive fuel rods survived

### Test-4: 1 STD rod, 2 additive fuel rods

- The STD rod failed after 11 minutes
- The two additive fuel rods survived



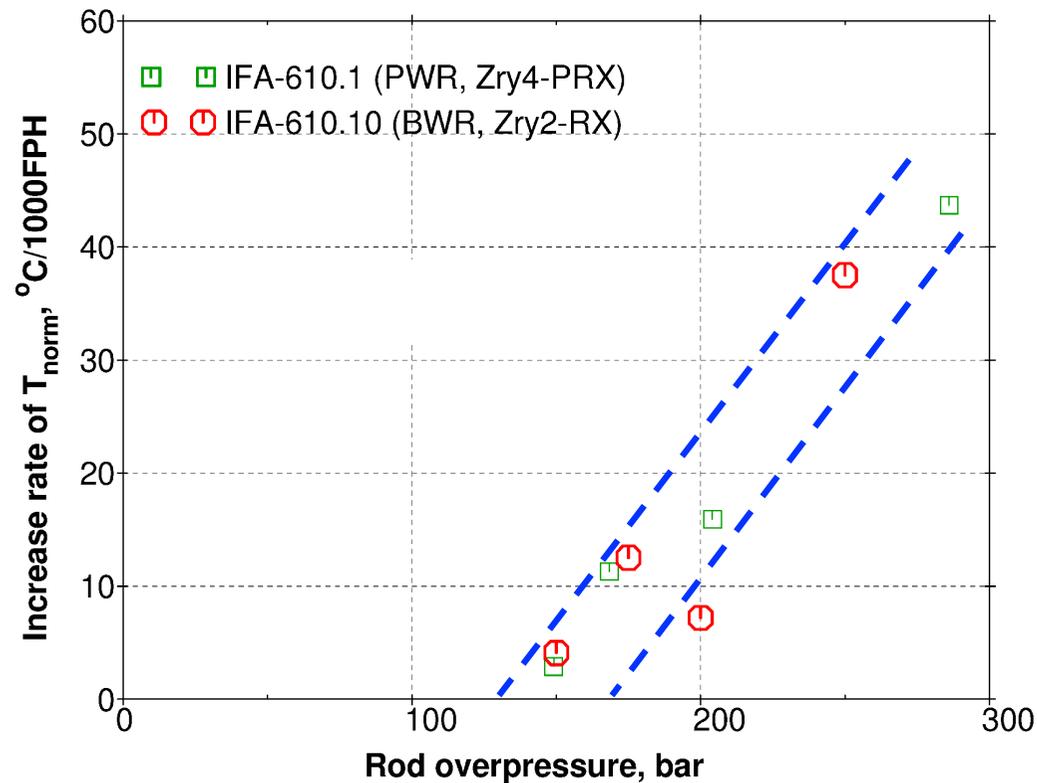
# New cladding assessment: Halden lift-off/ overpressure tests – IFA 610

- Objective is to provide data for understanding fuel rod behaviour under rod internal overpressure and for determining “clad lift-off” conditions under representative LWR conditions (incl. fast flux)
  - IFA-610.10: one re-fabricated  $\text{UO}_2$  / Zry-2 (RXA) BWR segment from KKL with a burn-up of 52 MWd/kgOx instrumented with TF and EC
  - IFA-610.11: one re-fabricated  $\text{UO}_2$  / E110 VVER-440 segment from Loviisa with a burn-up of 50 MWd/kgOx instrumented with TF and EC
- Status IFA-610.10
  - Operated for ~8,000 fph (6.8 MWd/kgOx) at overpressure steps of 50, 100, 150, 175, 200 and 250 bar (stable temp increase at 150 bar)
- Status IFA-610.11
  - Operated for ~5,000 fph (5.5 MWd/kgOx) at overpressure steps of 100, 150, 175, 200, 250 and 300 bar
- Plans
  - IFA-610.12 and IFA-610.13 will make comparison of RXA and SRA cladding behaviour during 2011 - 2012

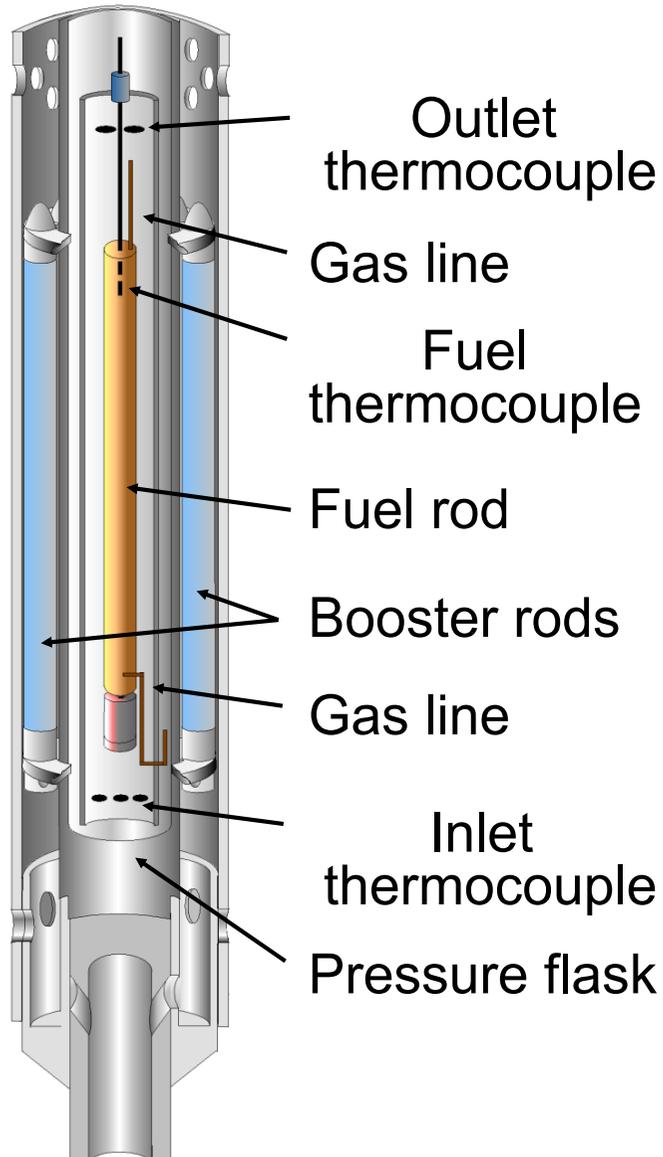


## Halden lift-off/ overpressure tests, main outcome

- Latest results are consistent with previous results (e.g. IFA-610.1 with PWR fuel - Zry-4 PRX cladding)



## Halden lift-off/ overpressure tests, next steps



- Compare two materials which are identical apart from the metallurgical state of the cladding
  - M-MDA-RX rod (70 MWd/kg)
  - M-MDA-SR rod (70 MWd/kg)
  - Then test ZIRLO cladding
- Tests will take 2-3 cycles each and are expected to elucidate
  - effect of cladding creep properties as influenced by RX and SR treatment of the same cladding material with the same irradiation history
  - influence of pellet-clad gap of fuel with strong bonding after high burn-up irradiation

# New cladding assessment: Corrosion test in demanding TH and WC conditions, IFA-708

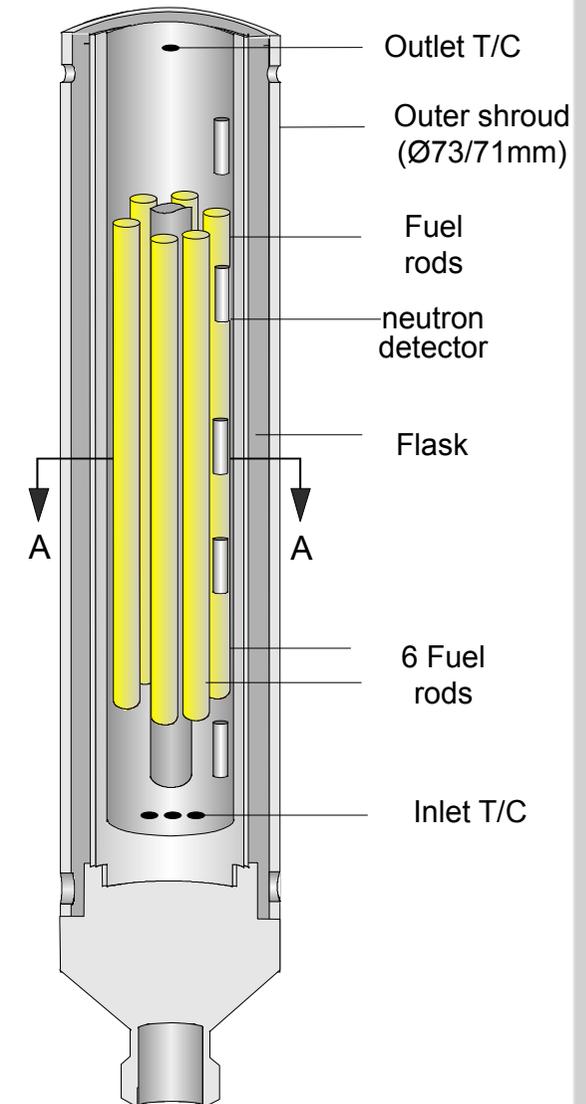
- Objective is to evaluate the performance of modern Zr-alloy cladding materials in aggressive conditions exceeding those currently allowable in operating PWRs
  - M-MDA plus variants from Japanese industry organisations
  - Opt. ZIRLO plus variants from Westinghouse (Sweden/USA)
  - M5 plus variants from Areva (France)
- Status IFA-708.1/IFA-708.2
  - 9 ppm Li, 1800 ppm B, pH<sub>300</sub> of 7. Results up to 240 fpd
- Status IFA-708.3
  - Started in July 2010 with fresh materials, segmented rods
  - 10 ppm Li, 1580 ppm B, pH<sub>300</sub> of 7.4, boiling conditions at top
- Plans
  - Continue IFA-708.3 with regular interim inspections for oxide thickness



# Halden corrosion test in demanding conditions

## IFA 708

- **Motivation and Background**
  - Utilities require data on in-pile corrosion behaviour in “aggressive” thermal-hydraulic and water chemistry conditions in order to determine margins
  - Several new cladding alloys have been developed for high duty and extended burn-up applications that need to be qualified in-core
- **Workscope**
  - Continuation of the 2009-2011 program using six fuelled segmented rods with interim inspections for oxide thickness determination
  - Opt. ZIRLO, M5 and M-MDA as industry references, with alloy variants
  - ~30 kW/m, 10 ppm Li / 1580 ppm B ( $\text{pH}_{300} = 7.4$ )
- **Deliverables**
  - Oxide thickness and hydrogen pick-up rates for modern PWR claddings with high Li water chemistry



## Halden corrosion test, IFA-708: Test Matrix

Westinghouse		AREVA		Japanese industry	
Opt. ZIRLO	Alloy A1	M5	Q32	J1	J2
Opt. ZIRLO	ZIRLO	M5	Q52	M-MDA (SR)	J2
Opt. ZIRLO	Alloy A5	M5	Q12	M-MDA (SR)	J3
Opt. ZIRLO	Low Sn High Fe ZIRLO	M5	Q42	M-MDA (SR)	J2



# Finally, a few words on the OECD Halden Reactor Project (HRP)

- International collaborative research for Safe and Reliable Operation of Nuclear Power Plants
  - affiliated to OECD NEA in Paris
  - located in Halden, Norway
  - operated by [Institute For Energy technology, IFE](#)
- **Halden Agreement** first signed in 1958
  - Renewed every 3rd year
  - Current program period from 2009 to 2011
    - (2008: Reached 50 years :>))
  - OECD countries, through a **Signatory organization**, signs the Halden Agreement
  - **Associated Party Agreement (APA)**
    - an extension to the original Halden Agreement to allow for multiple independent organizations in a country, or non-OECD countries, to participate to the HRP
- HRP is jointly funded by its members:
  - **18 countries**
  - > 100 nuclear organizations world wide
- Participant types
  - Utilities, Vendors, Licensing Authorities and R&D centers



# HRP Members – Signatories and Associated Parties

## Signatory members:

- **Norway** – **IFE** - Institutt for energiteknikk
- **Belgium** - **SCK/CEN** - Belgian Nuclear Research Centre
- **Denmark** - **Risø DTU**
- **Finland** - **TYÖ** – JA ELINKEINO-MINISTERIÖ - Finnish Ministry of Employment and the Economy, operated by **VTT**
- **France** - **EDF** - Electricité de France
- **Germany** – **GRS** - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
- **Japan** - **JNES** - Japan Nuclear Energy Safety Organization
- **Korea** - **KAERI** - Korean Atomic Energy Research Institute
- **Spain** - **CIEMAT** - Spanish Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- **Sweden** - **SSM** - Swedish Radiation Safety Authority
- **Switzerland** - **ENSI** - Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate
- **UK** - **NNL** – National Nuclear Laboratory
- **USA** - **US NRC** - United States Nuclear Regulatory Commission

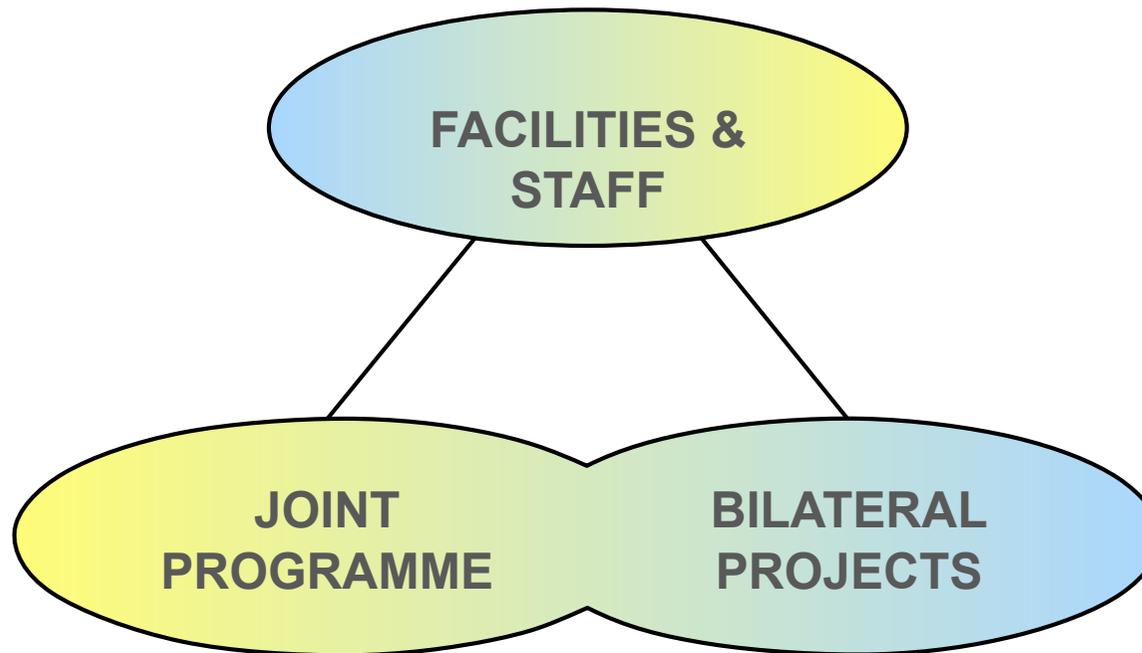
## Associated Parties:

- **USA**
  - **GE/ GNF** - Global Nuclear Fuel
  - **Westinghouse** Electric Power Company
  - **EPRI** - Electric Power Research Inst.
  - **DOE** – US Department of Energy
- **Japan**
  - **JAEA, CRIEPI (incl. Toshiba and 11 utilities) and Mitsubishi NF (incl. MHI)**
- **France**
  - **IRSN** - French Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
- **Czech Rep.** - **NRI** - Czech Nuclear Research Institute
- **Slovakia** - **VUJE** Slovak Nuclear Power Plant Research Institute
- **Hungary** - **KFKI** Hungarian Academy of Sciences, Atomic Energy Res. Inst.
- **Russia** - “**TVEL**” JSC.
  - Research Centre “Kurchatov Institute”,
  - Research Institute **VNIIAES**
- **Kazakhstan** – **Ulba** Manufacturing company
- **EU JRC** Transuranium, Karlsruhe



# Joint and Bilateral Programs at Halden

- All Joint Programme **deliverables** are open to the HRP members.
- In addition to the joint programme, HRP members can also carry out experiments and other contract work through **Bilateral arrangements**.



**THANK YOU**



# **Proyecto ARTIST: atenuación del término fuente en el generador de vapor durante secuencias SGTR de accidente severo**

**Luis E. Harranz**

*Responsable de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear. CIEMAT*

## **ÍNDICE**

**Motivación**

**El proyecto internacional ARTIST**

**Contribución de CIEMAT**

**Producción**

**Síntesis de resultados**

**Presente y futuro**

## ***Proyecto ARTIST:***

# ***Atenuación del Término Fuente en el Generador de Vapor durante Secuencias SGTR de Accidente Severo***

*Luis E. Herranz*

***Realizado por:***

*Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear, CIEMAT*

*Dirección: Luis E. Herranz*

*Equipo científico: C. López del Prá, F.J. Sánchez, R. Delgado*

*Equipo técnico: P. Bermúdez, A. del Río, M.A. Velasco*

***En colaboración con:***

*Consejo de Seguridad Nuclear, CSN*

# ÍNDICE

- ***Motivación***
- ***El proyecto internacional ARTIST***
- ***Contribución de CIEMAT***
- ***Producción***
- ***Síntesis de resultados***
- ***Presente y futuro***



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**  
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

*Jornada Técnica del CSN sobre  
Investigación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*

---

# *Motivación*



*Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear*

*Madrid (CSN), 3 de Marzo de 2011*

- **Secuencias SGTR – accidente severo** →
  - 11% CDF
  - Baipás de contención ▶
- **Retención en el GV?**
  - NUREG-1150  DF = 1
  - Industria  DF = 10000
- **Enorme complejidad !**
  - Geometría
  - Condiciones de contorno
    - T  500 – 1000 K
    - $v_{gas}$   cm/s - sonic
    - $C_p$  &  $d_p$
  - Fenómenos
    - Impactación, Dep. Tbt., dph, ...
    - Resuspensión, fragmentación, ...
    - Condensación
- **Capacidad potencial de retención (EU-SGTR)**



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**  
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

*Jornada Técnica del CSN sobre  
Investigación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*

# ***Proyecto Internacional ARTIST***

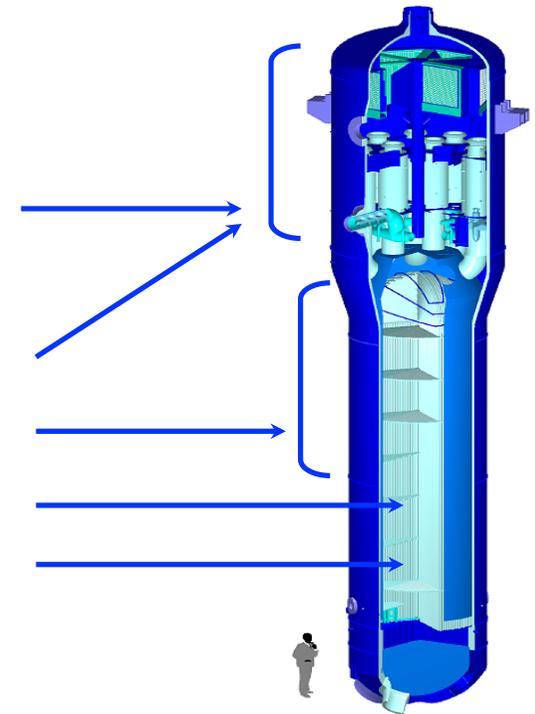


*Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear*

*Madrid (CSN), 3 de Marzo de 2011*

- **Objetivo:** Investigar la retención de aerosoles durante secuencias SGTR

- **Fases:**
  - Ensayos integrales (Fase VII)
  - Separadores y secadores (DBA) (Fase VI)
  - **Secundario inundado** (Fase V)
  - Separadores y secadores (Fase IV)
  - “Campo lejano” (Fase III)
  - **Etapas de rotura** (Fase II)
  - Interior de tubos (Fase I)



- **Participantes:** **PSI**  
HSK, USNRC, AVN, IRSN, **CSN** (CIEMAT), HSE, VTT, JNES  
Beznau NPP, Goesgen NPP, Ringhals NPP  
EFPL, U. Newcastle, U. Udine



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**  
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

*Jornada Técnica del CSN sobre  
Investigación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*

# *Contribución de CIEMAT (Fase II)*



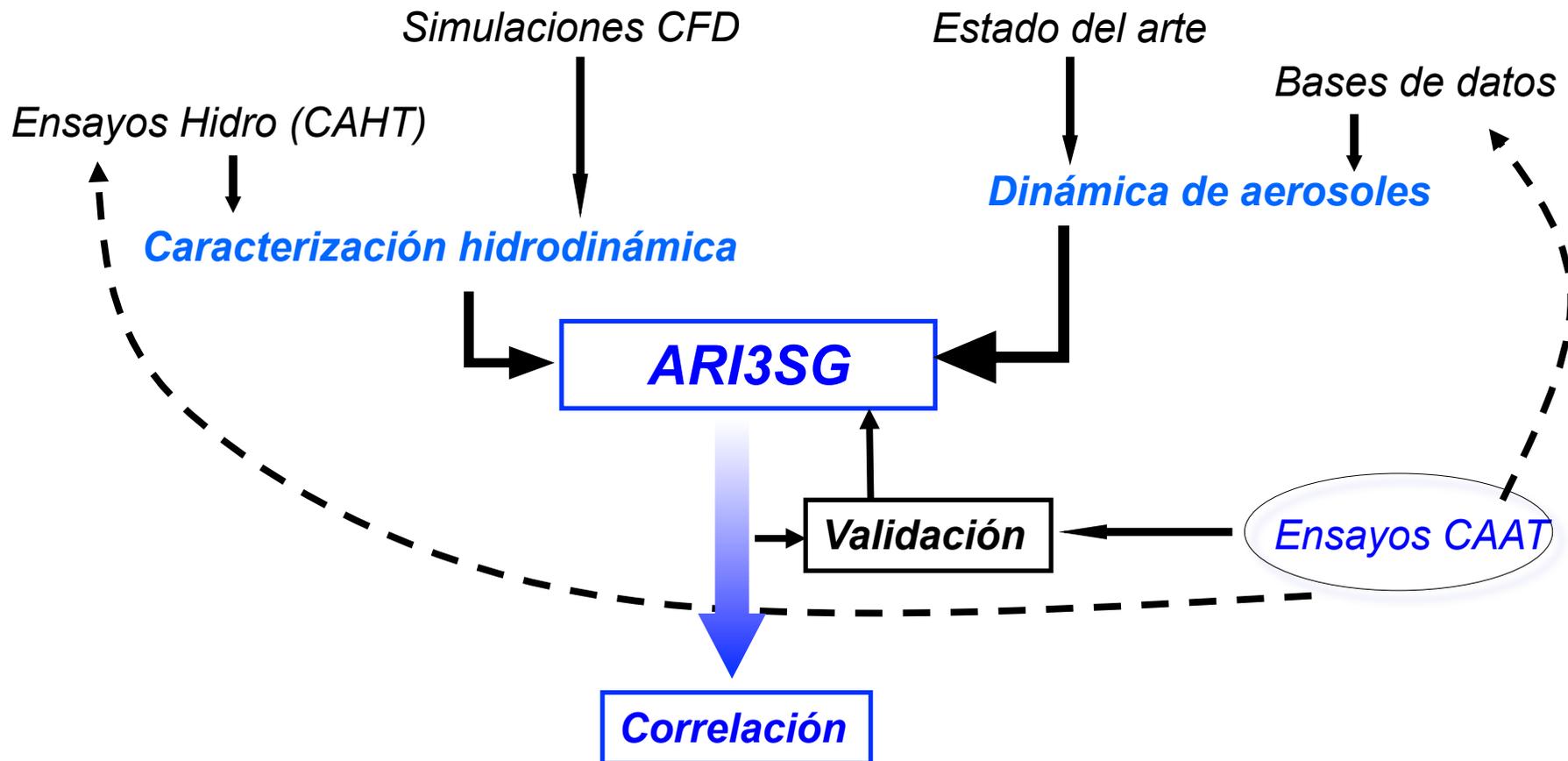
Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear

Madrid (CSN), 3 de Marzo de 2011

## **Objetivos y Alcance**

- **Objetivos:**
  - *Desarrollar y validar un modelo de retención de aerosoles en el secundario de un GV en condiciones SGTR.*
  - *Construir una base de datos para la validación del modelo.*
- **Alcance:**
  - *Región próxima a la rotura (“etapa de rotura”).*
  - *Ausencia de agua en el secundario del GV.*

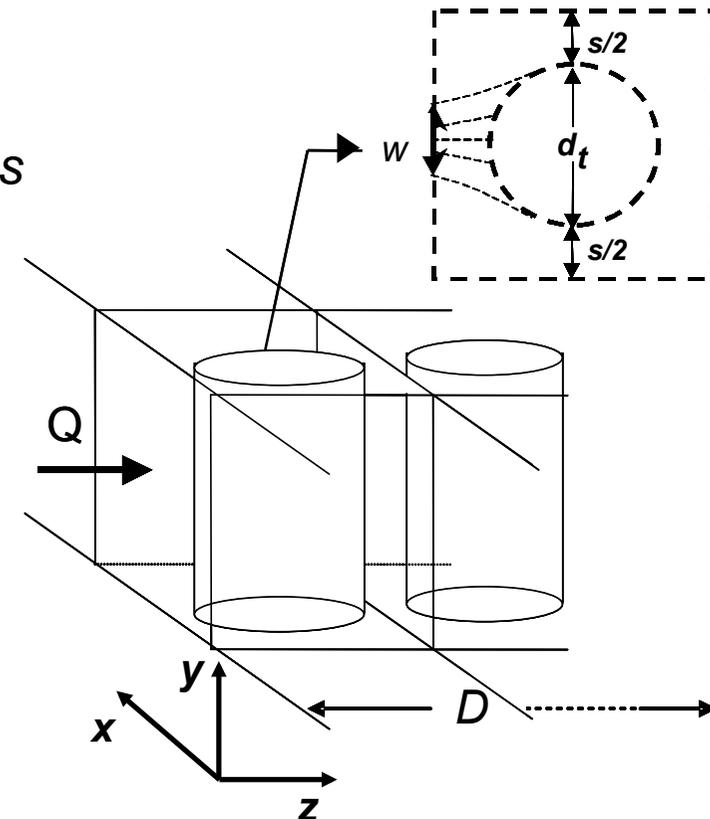
# Estrategia



# El Modelo ARI3SG: La Aproximación Filtro

## Principales hipótesis:

- Gas fluye perpendicularmente a los tubos
- Filtración uniforme en  $x$ - $y$
- Concentración uniforme de partículas



# El Modelo ARI3SG: La Aproximación Filtro

$$\frac{dm}{m} = \frac{w \cdot U \cdot L}{Q}$$

↓

**Factor geométrico**

**Profundidad filtración**

**Eficiencia individual de tubo**

$$\eta = \frac{m_{ret}}{m_{in}}$$

$$\eta_{TB} = 1 - \exp \left\{ - \frac{4 \cdot (d_t + s)^2}{4 \cdot (d_t + s)^2 - \pi \cdot d_t^2} \cdot \left[ 1 - \prod_i^{N_{tubes}} \left( 1 - \frac{d_t}{s + d_t} \cdot \eta_{ST}(i) \right) \right] \right\}$$

# El Modelo ARI3SG: Eficiencia de tubo (I)

$$\eta_{ST}^{(n)}(i) = \eta_{dp}(i) \cdot [1 - \eta_{rs}(i)] \cdot \frac{1 - [1 - \eta_{rs}(i)]^n}{n \cdot \eta_{rs}(i)}$$

**Eficiencia de deposición**

**Término de resuspensión**

$$\eta_{rs}(i) = \frac{m_{rs}(i)}{m_{dp}(i)}$$

$$\eta_{dp}(i) = \eta_{rd}(i) + \eta_{ax}(i) - \eta_{rd}(i) \cdot \eta_{ax}(i)$$

**Componente instantánea**

**Componente acumulativa**

$$[1 - \eta_{rs}(i)]$$

$$\frac{1 - [1 - \eta_{rs}(i)]^n}{n \cdot \eta_{rs}(i)}$$

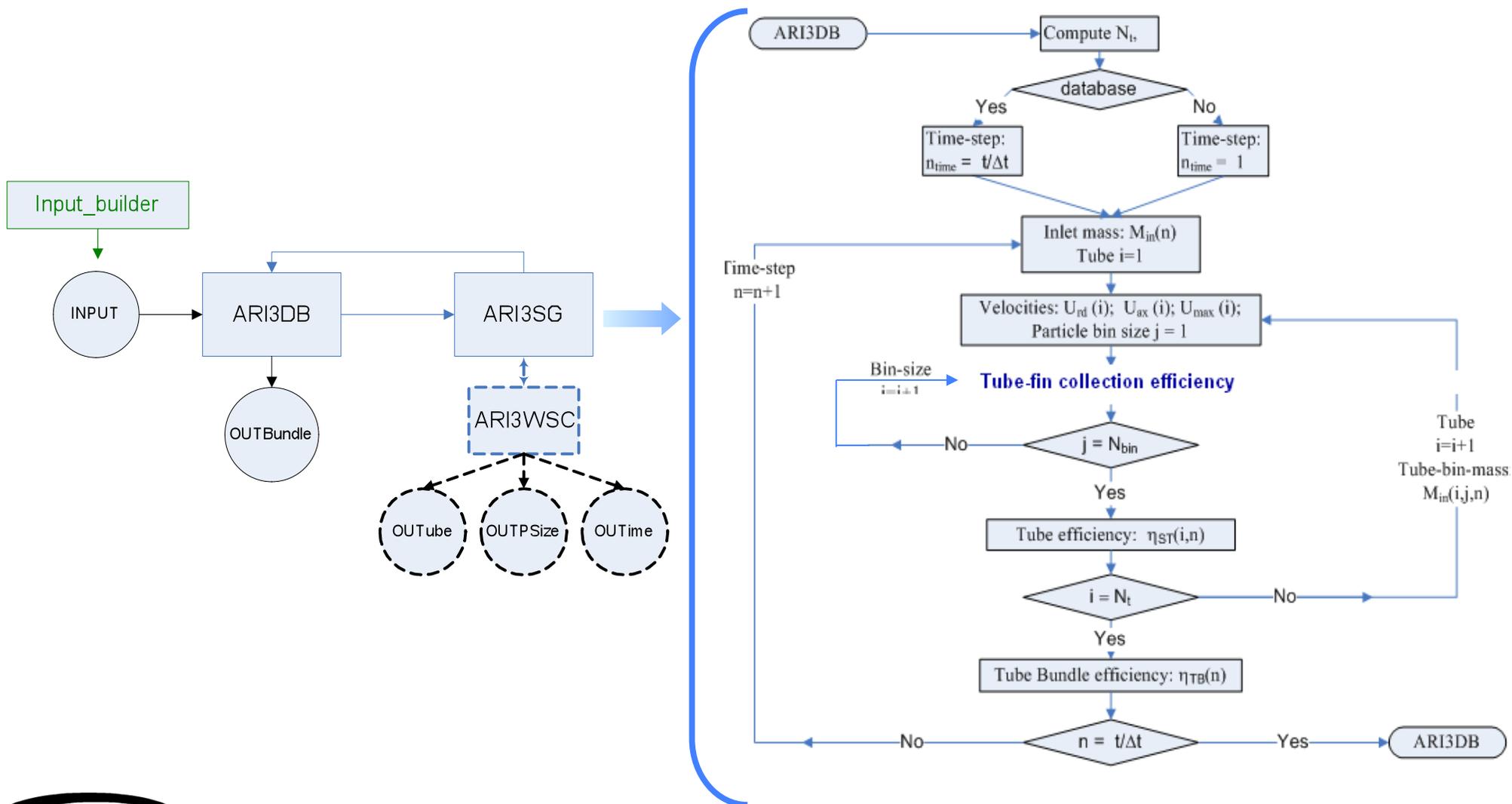
## El Modelo ARI3SG: Eficiencia de tubo (I)

→ **Caracterización del flujo**

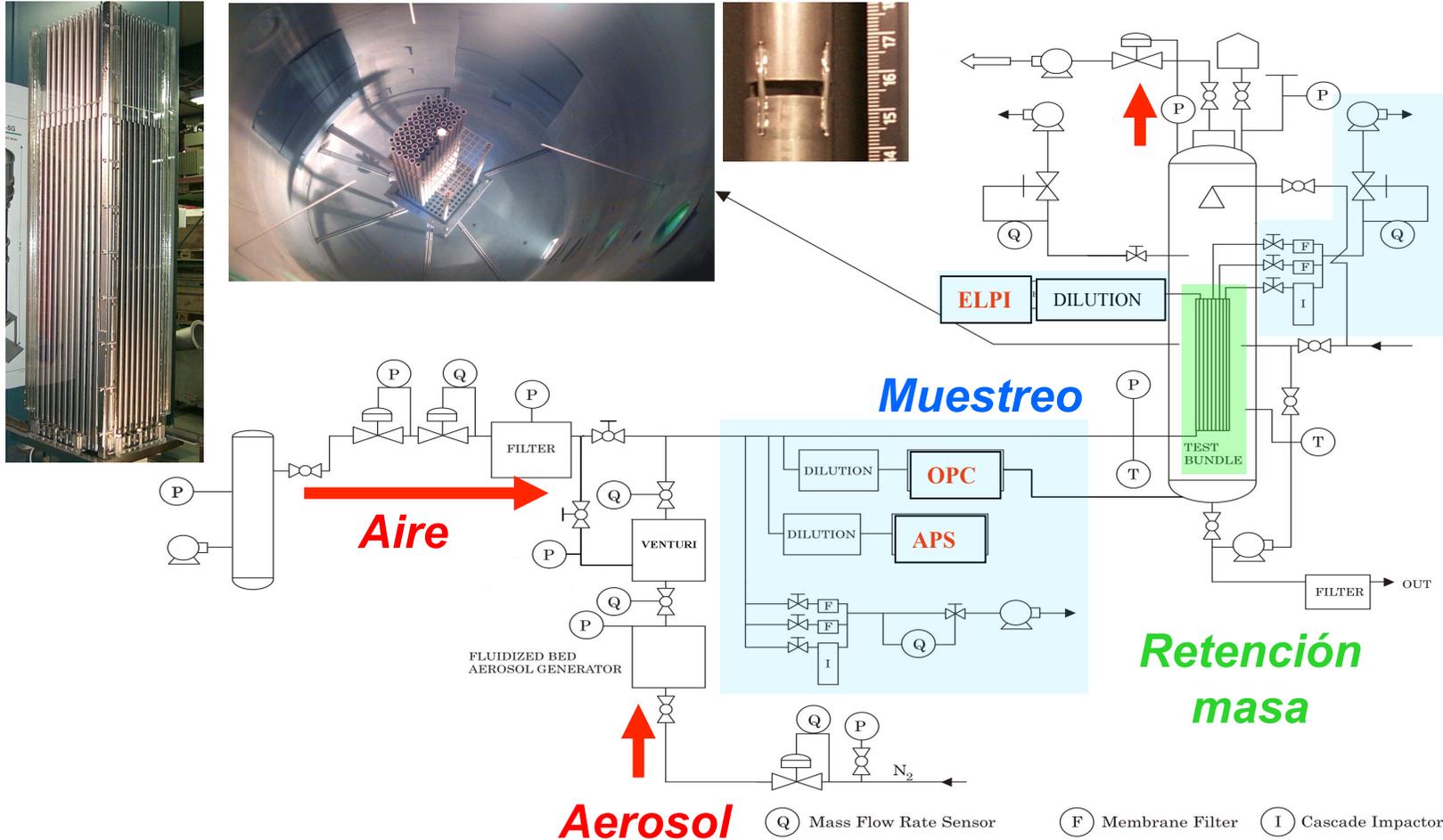


→ **“Discretización” de eficiencia:** 
$$\eta_{ST}^{(n)}(i) = \sum_{j=1}^{N_{bins}} y(j) \cdot \eta_{ST}(j)$$

# Plataforma ARICODE



# Validación de ARI3SG: Instalación PECA-SGTR



## Validación de ARI3SG: Base de Datos

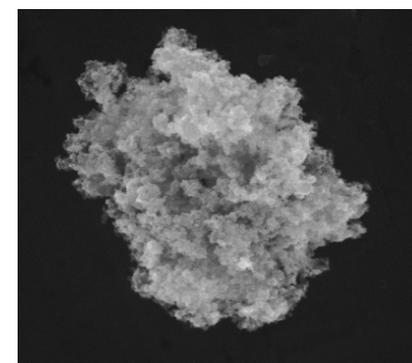
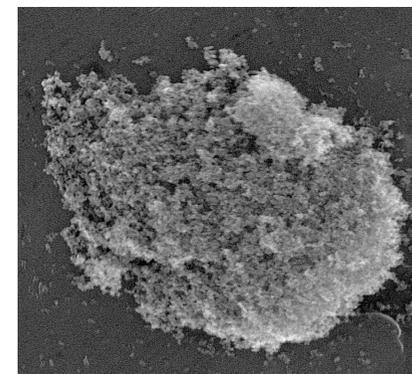
### Experimentos SGTR & CAAT (CIEMAT)

- **Velocidad:** 90-250 m/s
- **Aerosoles:**  $TiO_2$  Polidisperso  $\left[ \frac{\mu}{m} \right]$  Distribución

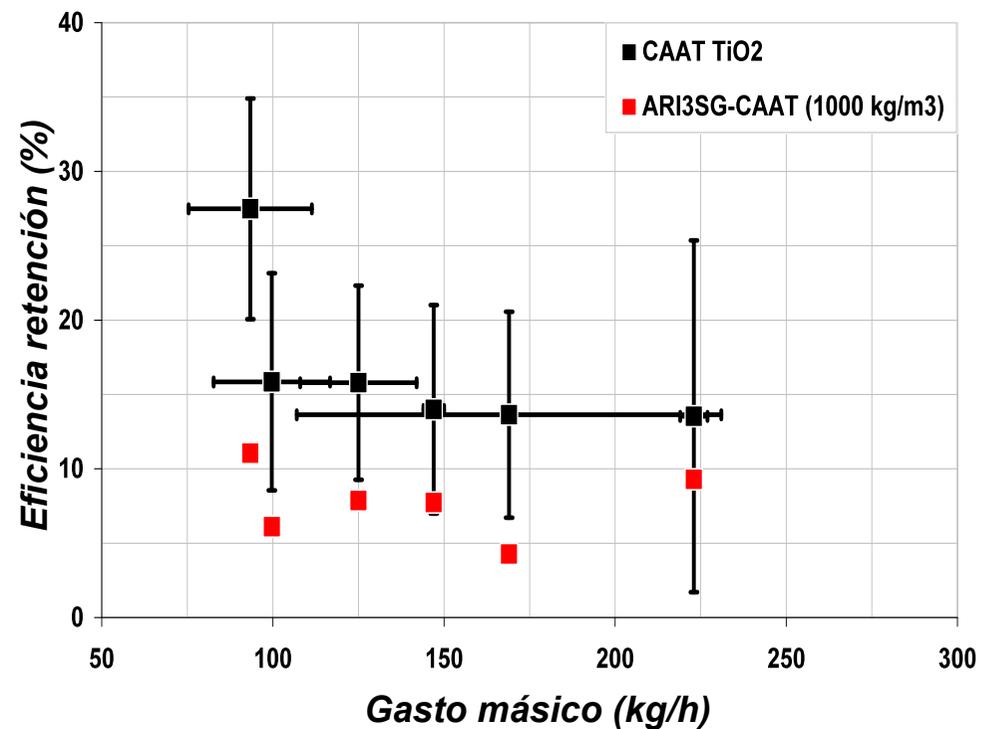
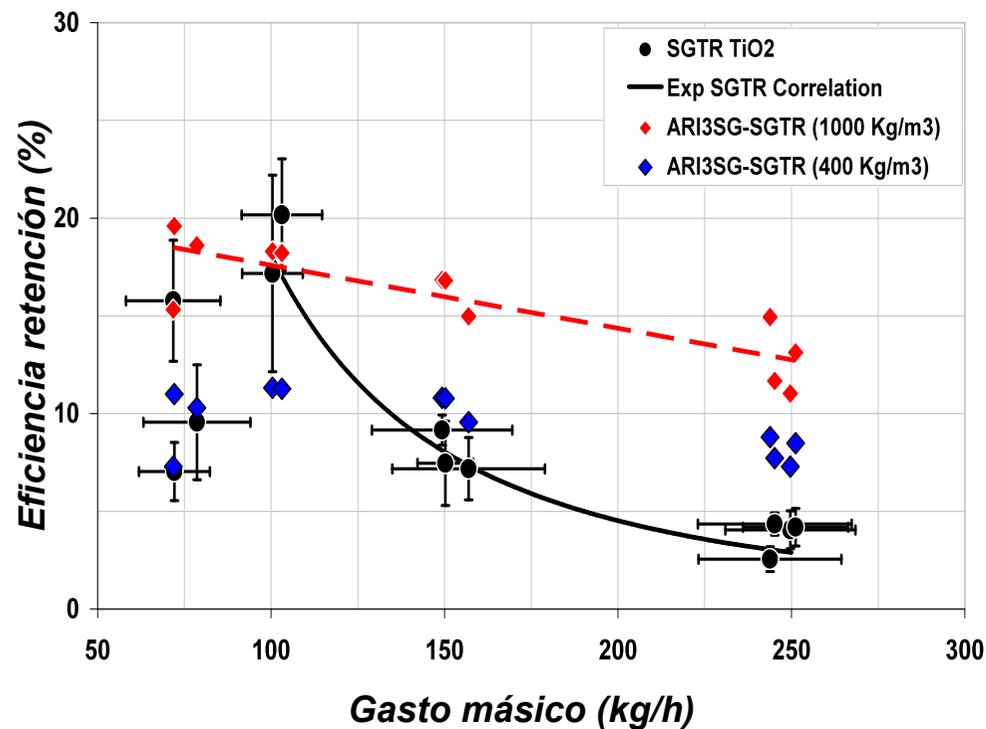
Lognormal

	<b>SGTR</b>	<b>CAAT</b>
AMMD	3 - 7 $\left[ \frac{\mu}{m} \right]$	0.7-3 $\left[ \frac{\mu}{m} \right]$
GSD	1.4-1.8	2-5

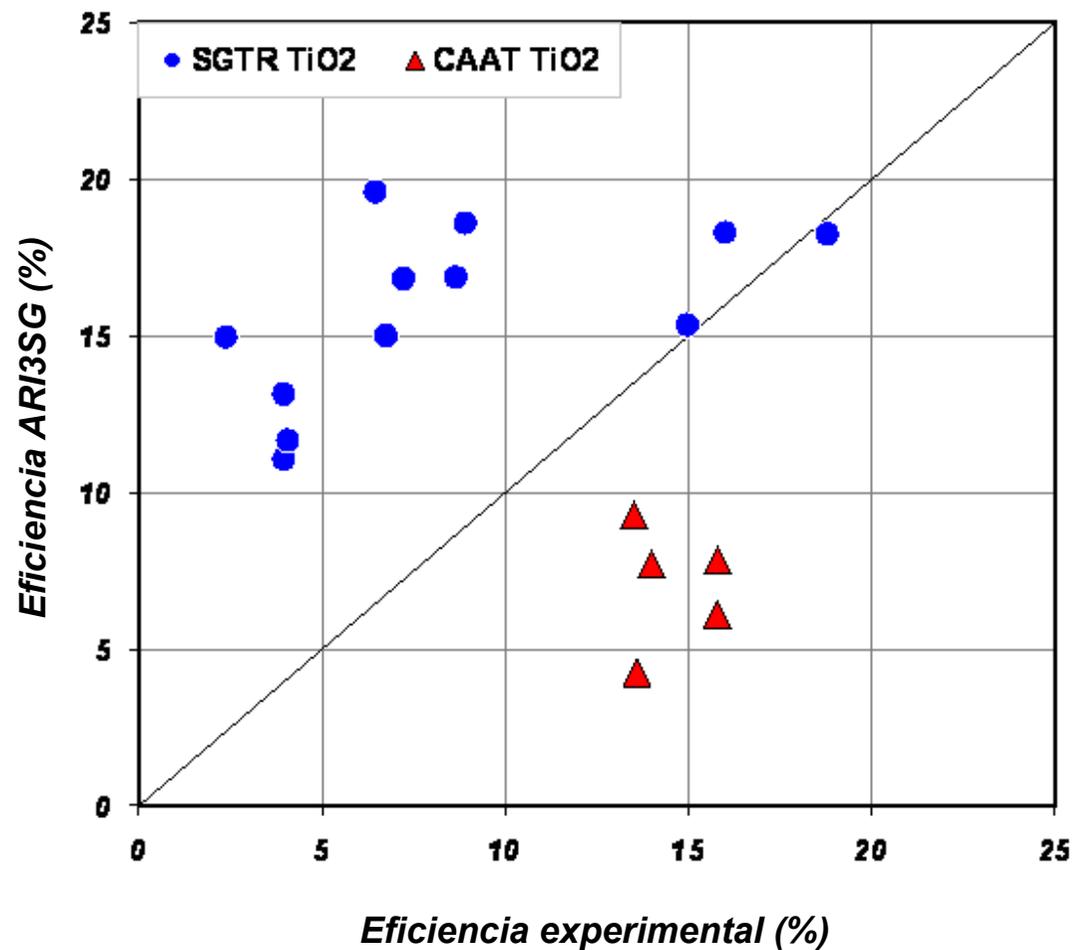
- **Densidad:** 1000 kg/m<sup>3</sup> (400 kg/m<sup>3</sup> – 2500 kg/m<sup>3</sup>)



# Validación de ARI3SG: Datos SGTR & CAAT



## Validación de ARI3SG: Datos SGTR & CAAT

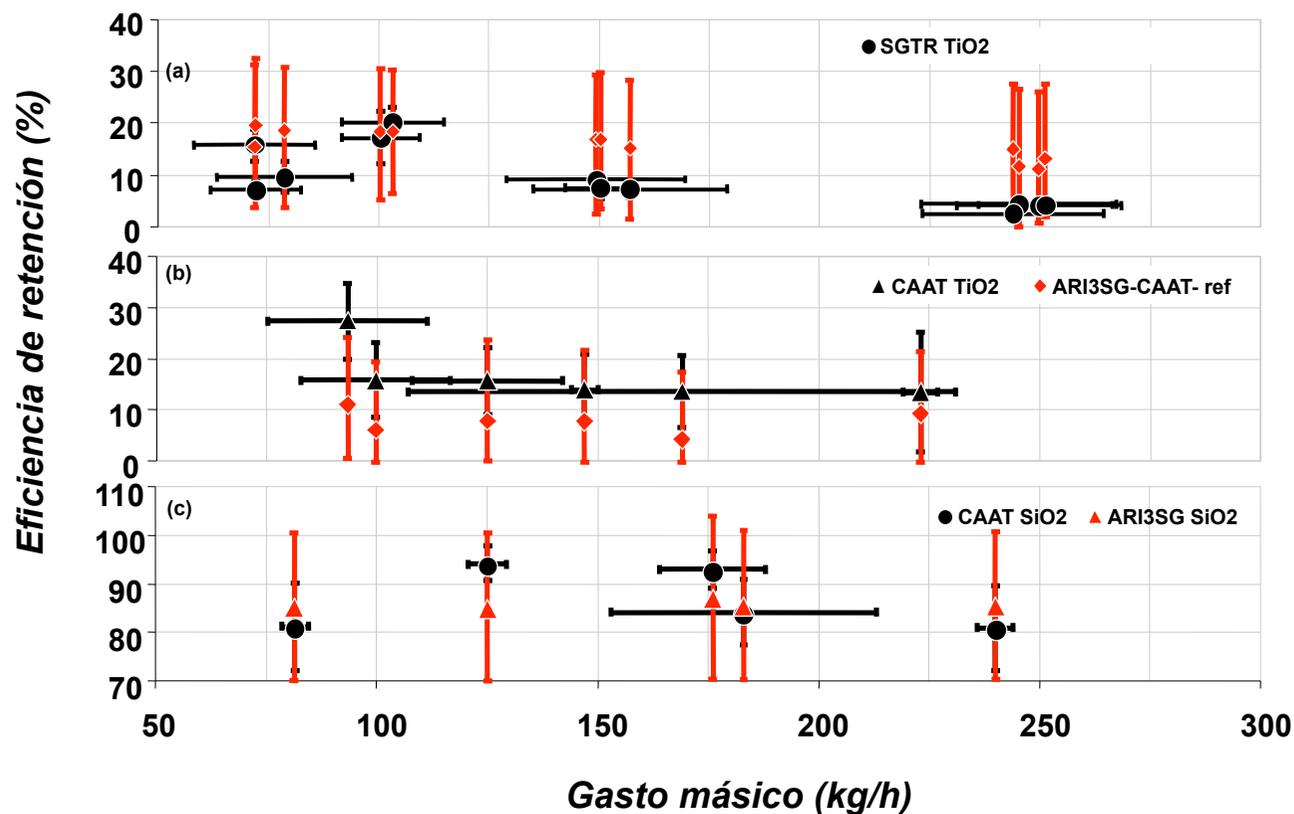


# Análisis de Incertidumbres de ARI3SG: Planteamiento

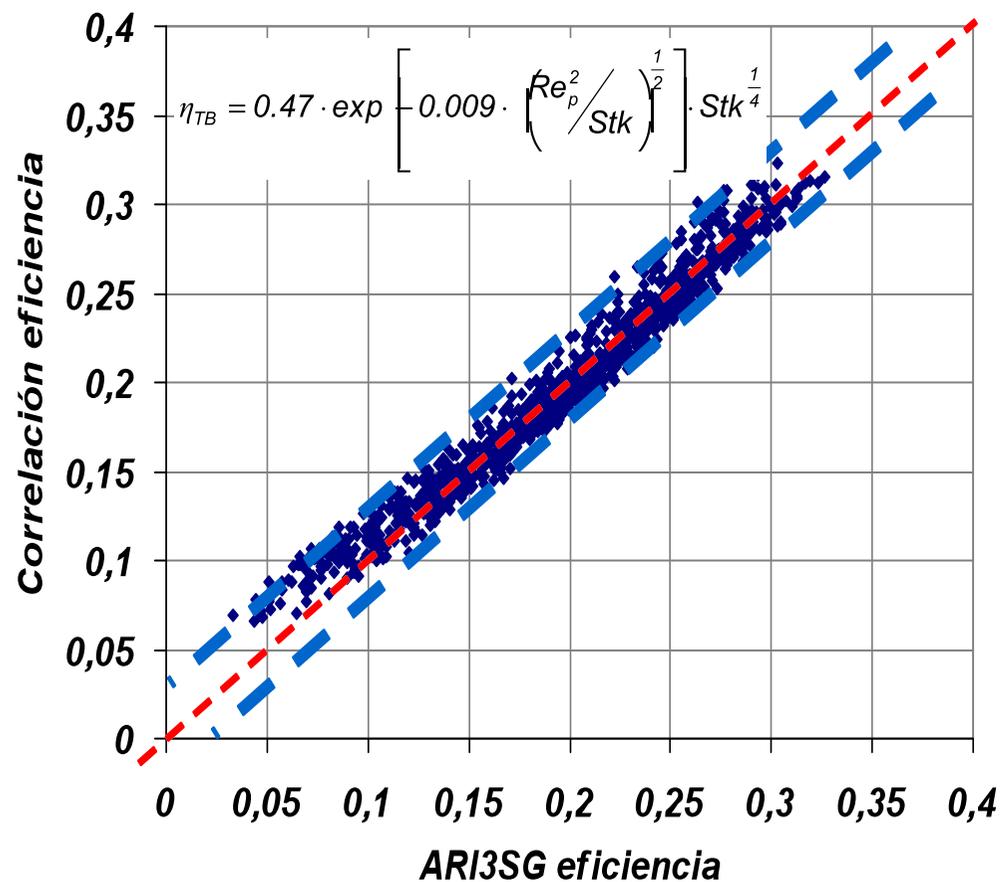
## Origen:

- *Aproximación de filtro*
- *Ecuaciones del modelo* 
- *Datos de entrada (i.e.,  $d_p$ ,  $v_{gas}$ ,  $\rho_p$ )* 

# Análisis de Incertidumbres de ARI3SG: Resultados



## Derivación de Correlación Teórica





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**  
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

*Jornada Técnica del CSN sobre  
Investigación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*

---

# *Producción*



Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear

Madrid (CSN), 3 de Marzo de 2011

# Tecnológica

- **Informes:**
  - “Aerodynamic characterization of jets within the break stage during severe accident SGTR sequences”. **DFN/SN-04/OP-07.**
  - “Experiments and modeling of aerosol retention in the break stage of a failed steam generator during severe accident SGTR sequences”. **DFN/SN-01/OP-10.**
- **Códigos y Modelos:**
  - **Correlación CIEMAT-ARI3SG**
  - **Plataforma ARICODE (modelo ARI3SG)**
  - **Geometría de haz de tubos (GAMBIT)**
  - **Simulaciones 3D hidrodinámicas con FLUENT 6.2**
- **Base de datos**

# Científica

- **Revistas internacionales:** 7 (+2)
  - “Major Challenges to Model Aerosol Retention in the Nearby of a Tube Breach During SGTR Sequences”. *Nucl. Tech* 158, 83-93.
  - “Preliminary Steps towards Assessing Aerosol Retention in the Break Stage of a Dry Steam Generator during SGTR Sequences”. *NED* 238, 1392–1399.
  - “Expansion of a radial jet from a guillotine tube breach in a shell-and-tube heat exchanger”. *Exp. Therm. & Fluid Sci.* 32, 947-961.
  - “Aerodynamics of a gas entering the secondary side of a vertical shell-and-tube heat exchanger: Numerical analysis of anticipated severe accident SGTR conditions”. *Eng. App. Com.FI. Mech.* 4, 91-105.
  - “Aerosol Retention in the nearby of a breach in a tube bundle: and experimental investigation”. *Aer. Sci. & Tech.*, 44, 349-361.
- **Conferencias internacionales:** 11 (+2)
- **Revistas y conferencias nacionales:** 10 (Premio Nuclear España, 2006)

# Académica

- **Tesis doctorales:**

- *“Experimental Characterization of Aerosol Retention in the Break Stage of a dry Steam Generator in SGTR Sequences”. Diciembre 2008.*

*F.J. Sánchez Velasco.*

- *“Theoretical Investigation of Aerosol Retention within the Secondary Side of a Steam Generator under a SGTR Severe Accident Sequence in a PWR NPP”. Junio 2011.*

*C. López del Prá.*

# Síntesis

*Las estructuras del GV atenuarían el término fuente durante secuencias SGTR de accidente severo, **incluso en ausencia de agua.***

- **ARI3SG:**

*Extensión de la capacidad analítica en secuencias SGTR de accidente severo.*

- *Herramienta sencilla, bien estructurada y fácil de usar en códigos (correlación).*
- *Modelo validado y complementado por un análisis de incertidumbres.*

- **Base de datos:**

*Validación y comprensión del escenario.*

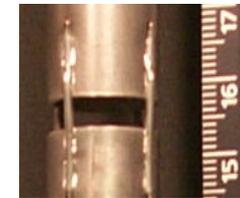
- *Factores de influencia (i.e., naturaleza de las partículas y gasto)*
- *Fenómenos “imprevistos” (i.e., resuspensión y fragmentación)*

# *Presente y Futuro: ARTIST2*

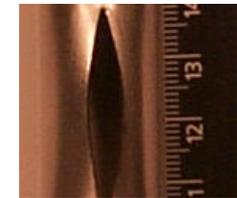
- **Ponderación del efecto de la retención en la etapa de rotura**
  - Simulación de secuencias SGTR con el código MELCOR (+ ARI3SG)

- **Caraterización experimental de:**

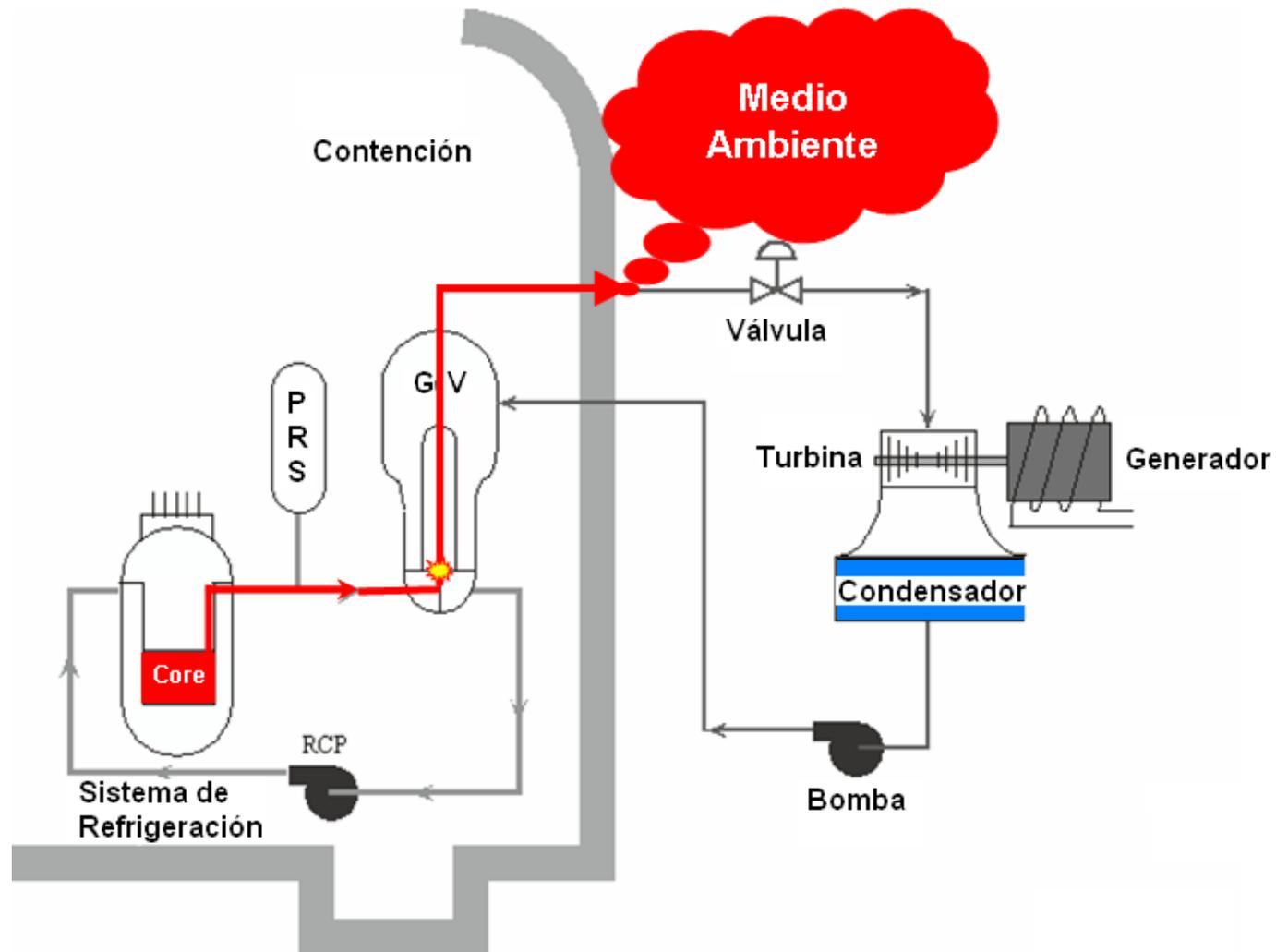
- El efecto de la forma de la rotura
- La influencia de la vibración de los tubos



vs.



- **Extensión de la capacidad analítica en escenarios “húmedos” (UPV):**
  - Modificación de la hidrodinámica en MELCOR (SPARC90)
  - Inclusión del efecto de superficies sumergidas





# El Modelo ARI3SG: Eficiencia de deposición

## Análisis de Importancia

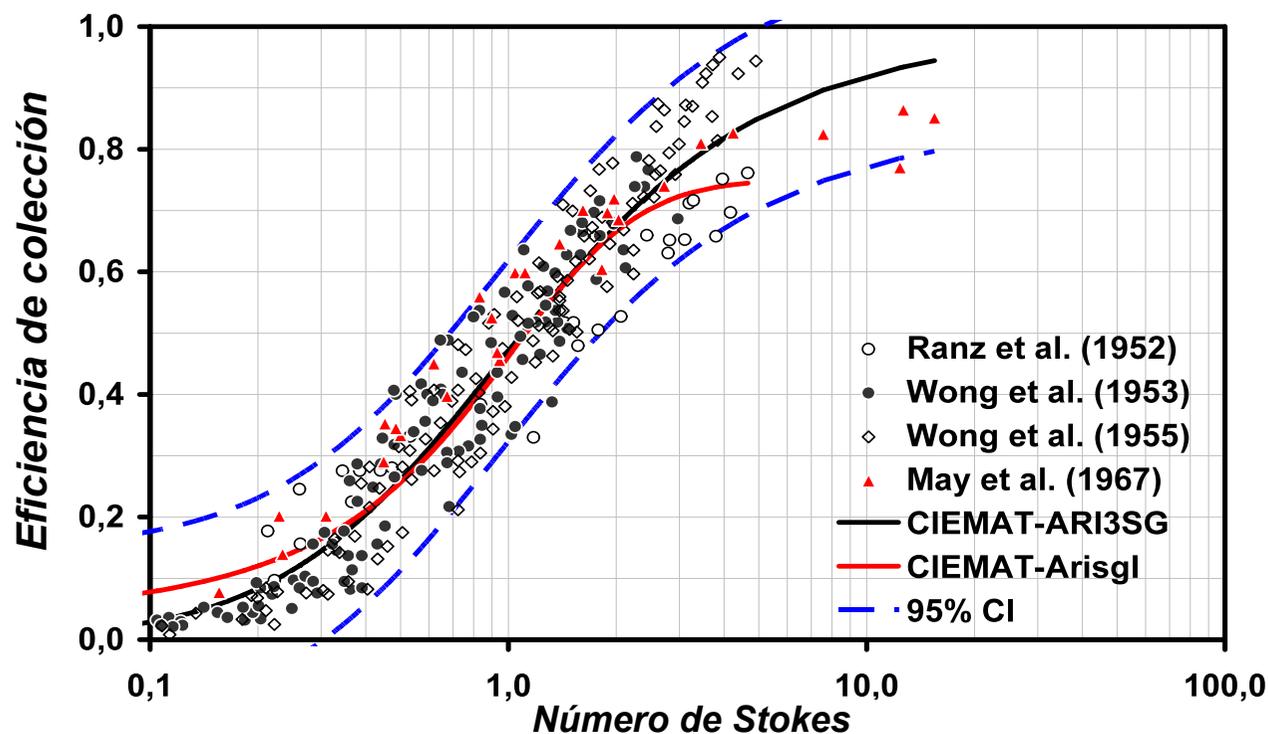
	PARÁMETRO CARACTERÍSTICO	VALOR ESTIMADO
<b>IMPACTACIÓN</b>	$C_c \frac{\rho_p \cdot d_p^2 v_{gas}}{18 \cdot \mu d_T}$	$> 10^{-2}$
<b>DEPOSICIÓN TURBULENTO</b>	$\frac{(\mu \cdot v_{gas} \cdot d_T)^{0.5}}{\rho^{0.5} \epsilon_o}$	$> 10^{-2}$
<b>SEDIMENTACIÓN</b>	$C_c \frac{\rho_p \cdot d_p^2 g}{18 \cdot \mu v_{gas}}$	$\sim 10^{-6}$
<b>INTERCEPCIÓN</b>	$\frac{d_p}{d_T}$	$\sim 10^{-4}$

## El Modelo ARI3SG: Eficiencia de deposición

Números adimensionales	$Re_g$	Stk	$Re_p$	$R_{\%}^2 / Stk$
SGTR	$10^4 - 10^5$	0.01-10	0.1-300	100-1000
<b>Deposición turbulenta flujo cruzado</b>				
Douglas (1980)	100-8000	0.002-0.07	0.1-0.6	-
<b>Deposición turbulenta flujo axial</b>				
Liu and Agarwal (1974)	$10^4 - 5 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^{-3} - 5.86$	1.09-82	222-1170
<b>Impactación inercial</b>				
Ranz and Wong (1952)	67-500	0.22-4.8	0.29-8.4	0.38-15
Wong and Johnstone (1953)	13-330	0.087-2.4	0.25-4.4	0.72-8
Wong et al. (1955)	13.7-330	0.1-4.9	0.17-4.2	0.13-4.54
May and Clifford (1967)	165-8500	0.15-15	3-18	-

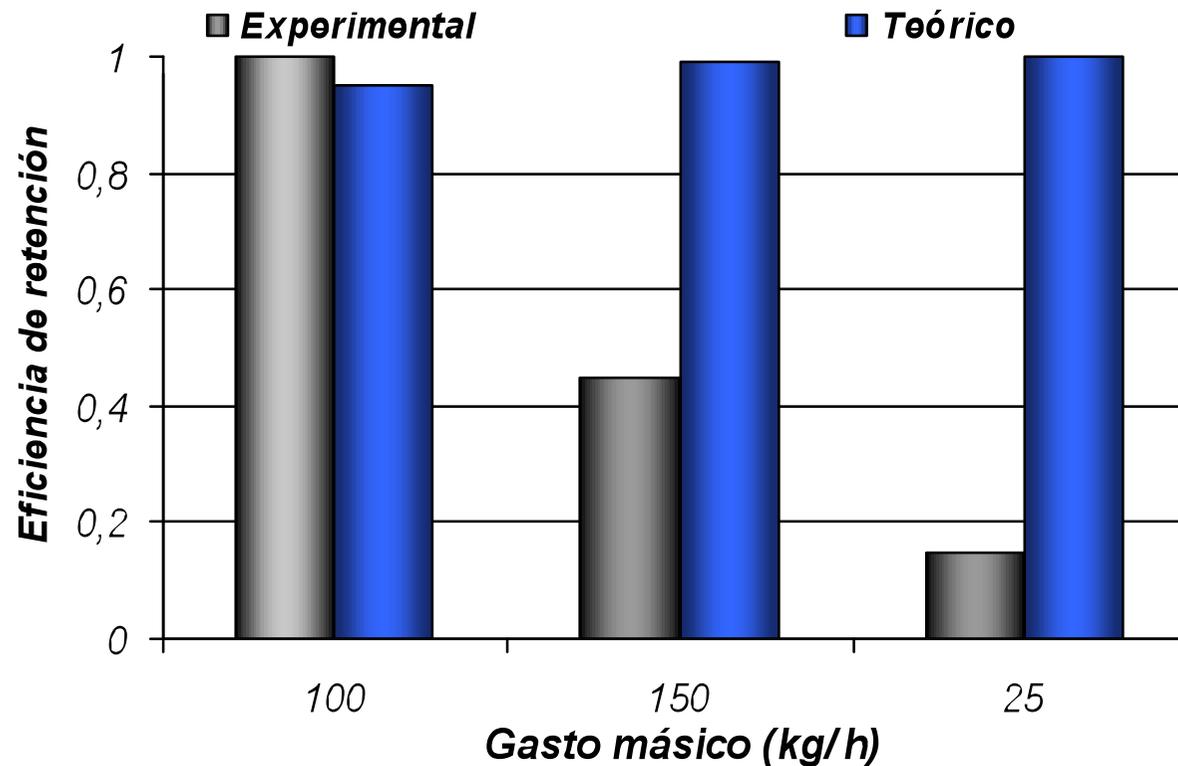
# El Modelo ARI3SG: Eficiencia de deposición

## Impactación inercial



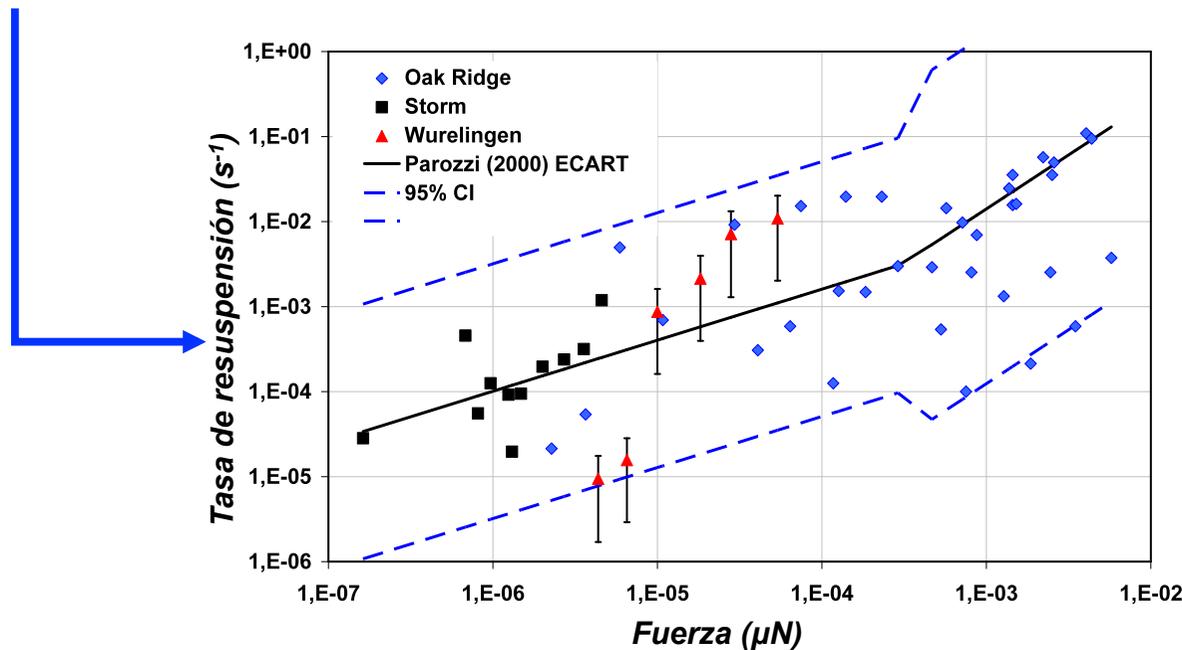
# El Modelo ARI3SG: Eficiencia de Resuspensión

## Análisis de Consistencia



# El Modelo ARI3SG: Eficiencia de Resuspensión

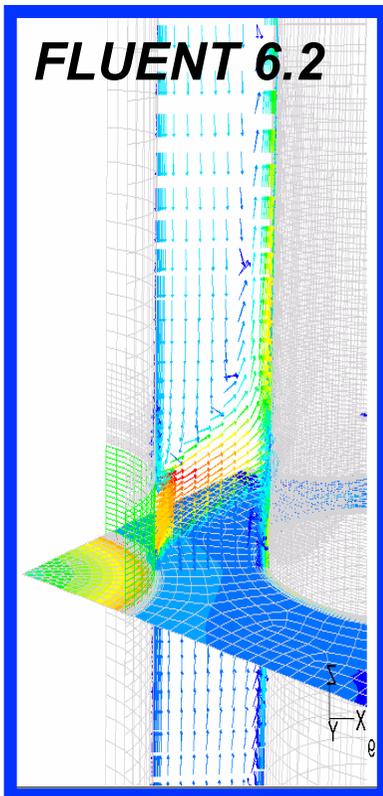
$$F_{rs} = \frac{\mu_g^2}{\rho_g} \cdot (Re_g^*) \cdot \left[ \frac{\pi}{4} + 4.21 \cdot (Re_g^*)^{0.31} \right] - 4.644 \cdot 10^{-7} \cdot d_p$$



$$\eta_{rs} = 1 - \exp(-\Lambda(F_{rs}) \cdot \Delta t)$$

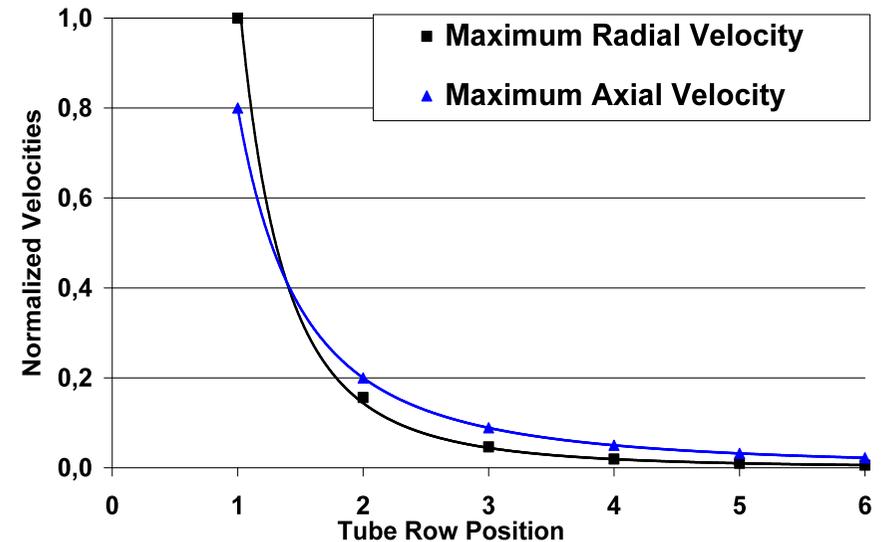
# El Modelo ARI3SG: Caracterización del flujo

Simulaciones 3D: → Velocidad:



$$U_r(i) = \frac{5}{4 \cdot i^3} \cdot U_r(1)$$

$$U_z(i) = \frac{4}{5 \cdot i^2} \cdot U_r(1)$$



→ Penetración del chorro (profundidad de filtro):

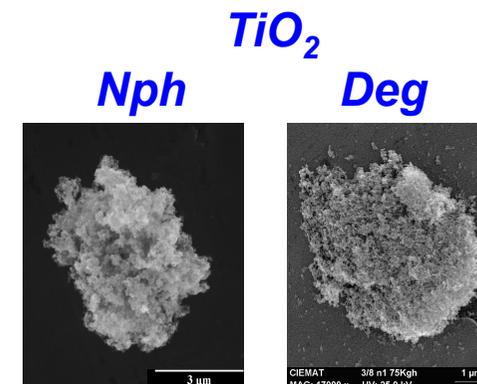
$$N_t = \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \frac{12.5 \cdot L_t}{d_t + s} + 1 \right)^{0.5} - 1 \right)$$



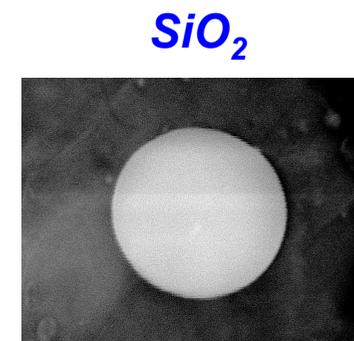
# Matriz Experimental

TEST	Gasto másico (kg/h)					Partículas		
	75	100	150	200	250	TiO <sub>2</sub> (Deg)	TiO <sub>2</sub> (Nph)	SiO <sub>2</sub>
1		X				X		
2					X	X		
3		X					X	
4				X			X	
5			X				X	
6		X						X*
7			X					X*
8				X				X
9		X						X
10			X					X
11					X			X
12			X			X		
13	X							X

\* low concentration tests.

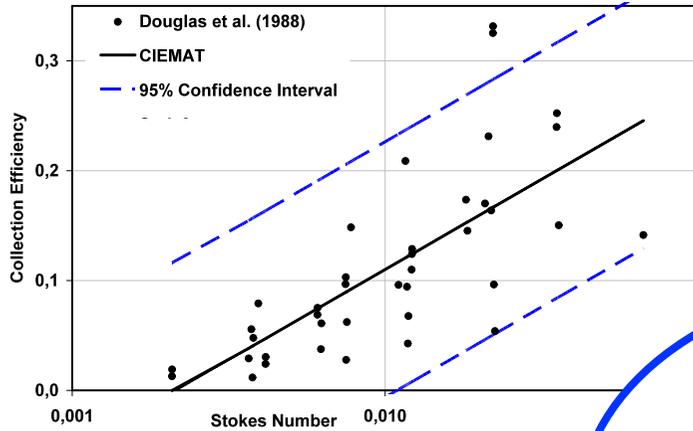


AMMD ~1.5µm

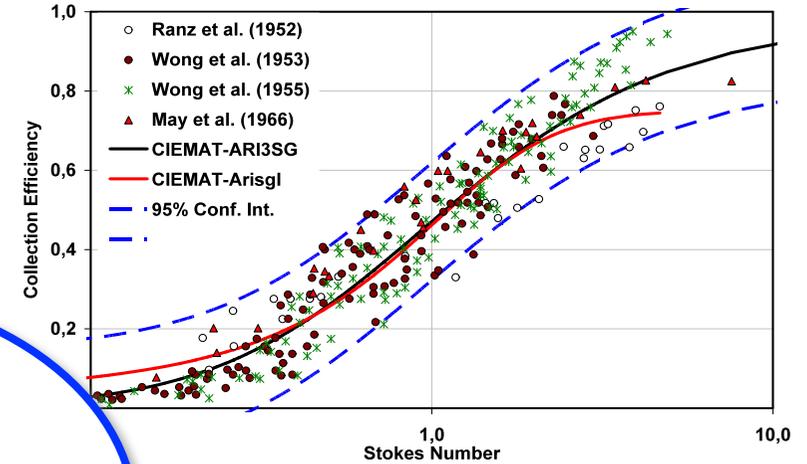


AMMD ~1.4µm

### Deposición turbulenta



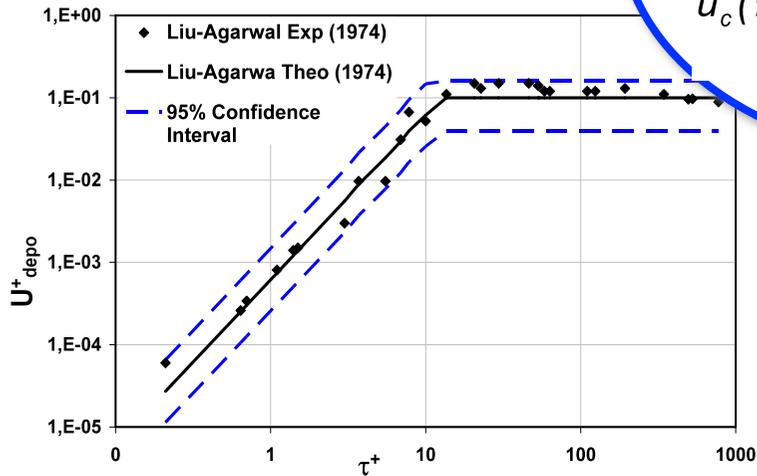
### Impactación inercial



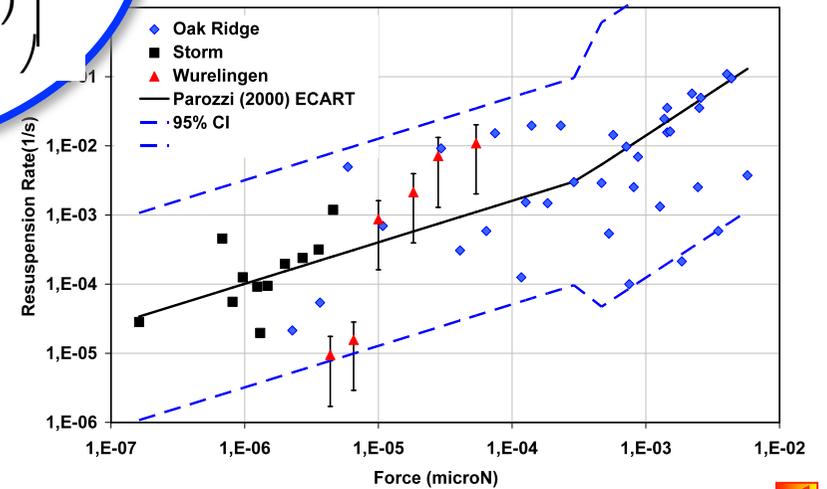
$$\eta = f(x_1, \dots, x_N)$$

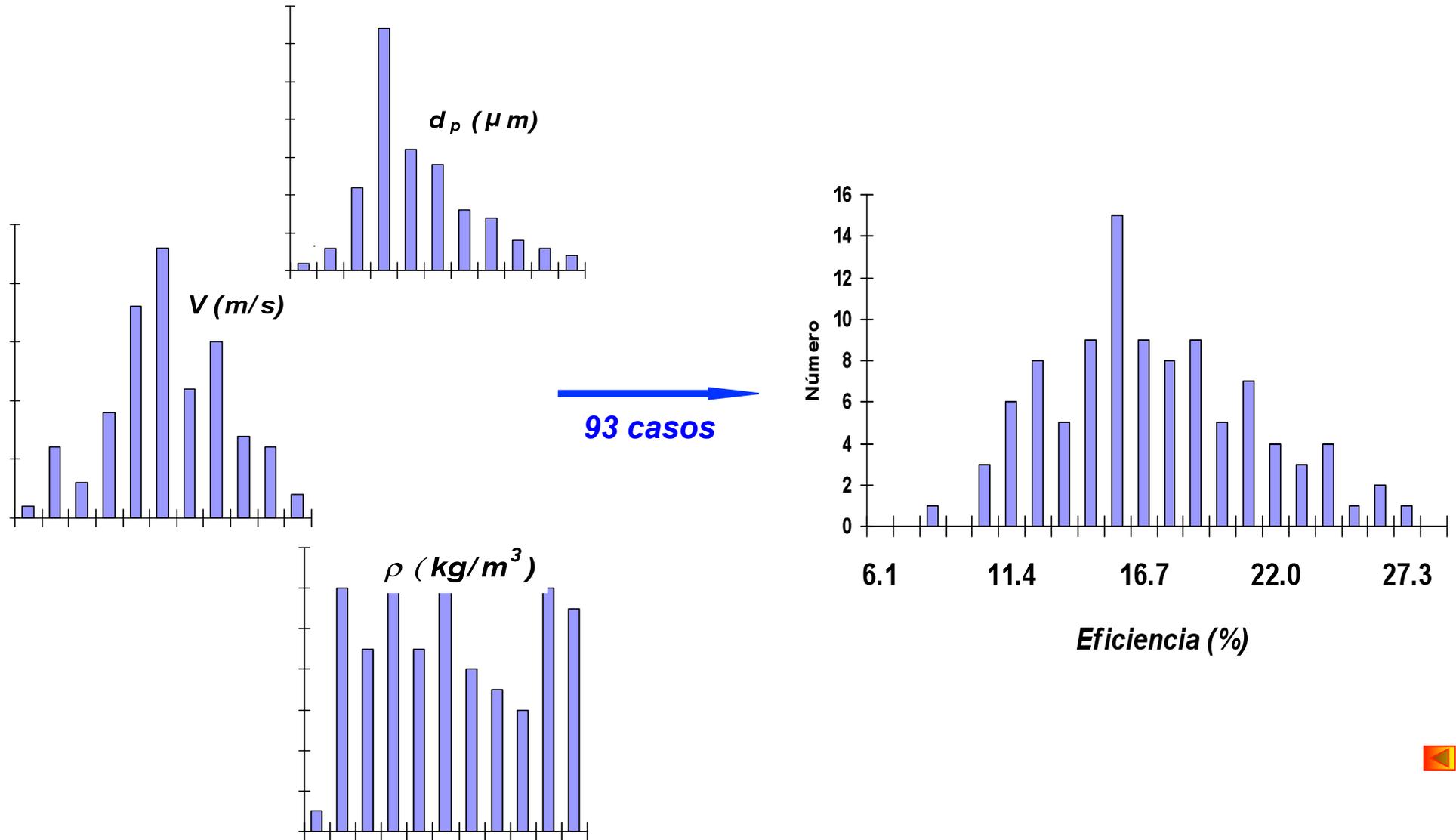
$$u_c(\eta) = \left( \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \right)^{1/2}$$

### Deposición axial



### Resuspensión







MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**  
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

*Jornada Técnica del CSN sobre  
Investigación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*

---

***¡¡Gracias por su atención!!***



Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear

Madrid (CSN), 3 de Marzo de 2011

# **Participación del CSN en el proyecto SM2A (Safety Margin Assessment and Application) del CSNI**

Javier Hortal

*Área de Modelación y Simulación. CSN*

## **ÍNDICE**

**Introducción**

**The CSNI Safety Margin Action Plan (SMAP)**

**SMAP transition to SM2A**

**Application to CCW sequences**

**Results**

**Next to do**



# **Participación del CSN en el proyecto SM2A del CSNI**

J. Hortal

## Motivation of the CSNI Safety Margin Action Plan

- In past years, a significant number of nuclear power plants underwent extensive modifications, most notably, power uprates.
- Although all the regulatory criteria are met, it is considered that safety margins could be significantly affected by the change.
- Risk increases, as measured by existing plant PSAs, are not an adequate indication of safety margin erosion.
- A methodology to assess plant safety margins becomes necessary.

## Mandate

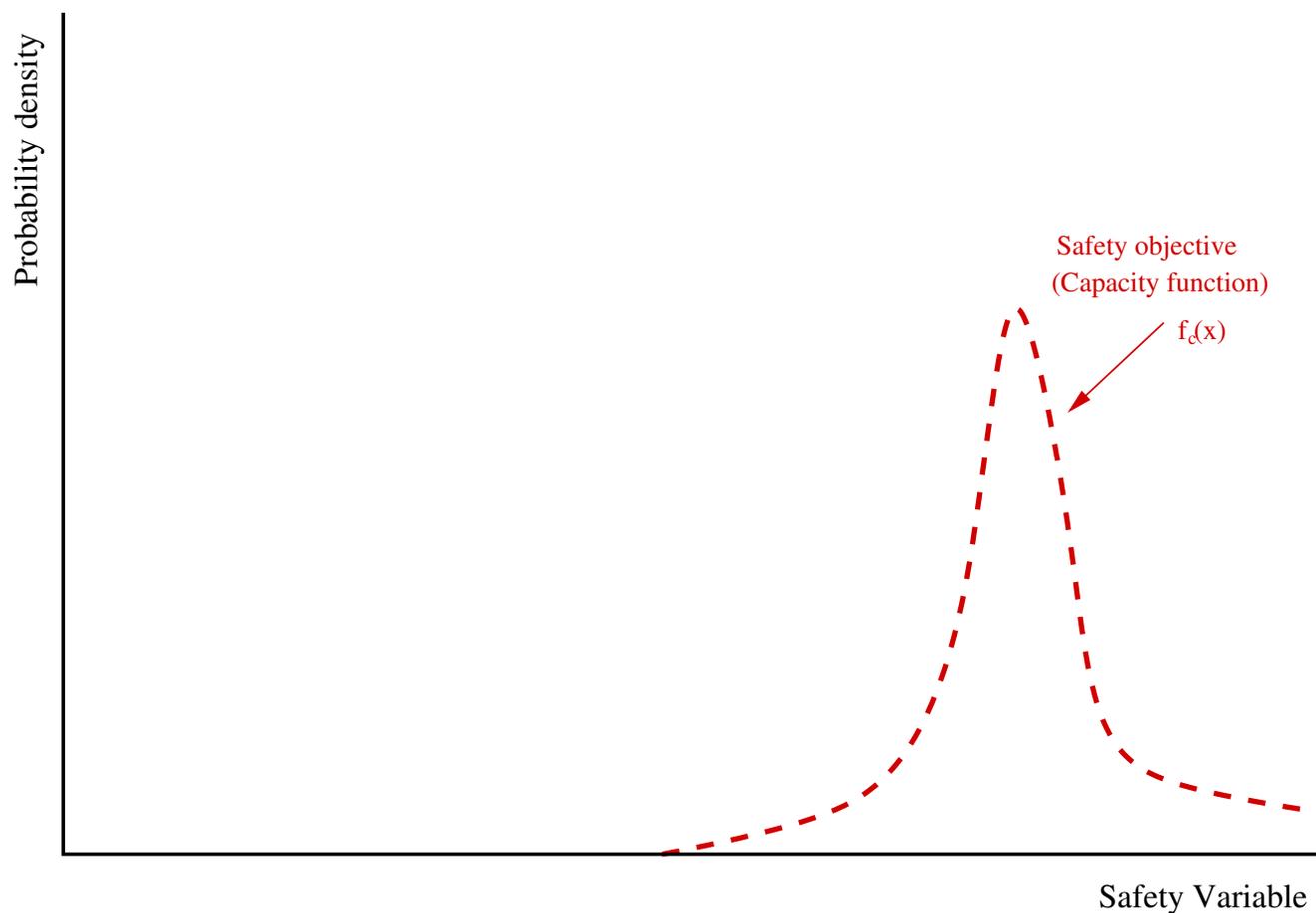
- Upon the concerns raised by several nuclear safety experts, the Committee for the Safety of Nuclear Installations (CSNI) approved in December 2003 the Action Plan on Safety Margins (SMAP) and established an international Working Group.
- **General objective:** To develop guidance on how to assess safety margins in nuclear power plants.
- **Detailed objectives:**
  - To agree on a common conceptual framework that, based on both probabilistic and deterministic considerations, could address the safety margin problem.
  - To develop guidance on how safety analysis methods and tools can be used to address the safety margin problem.
  - To exchange information and experience among the participating organizations.

## Key ideas of SMAP

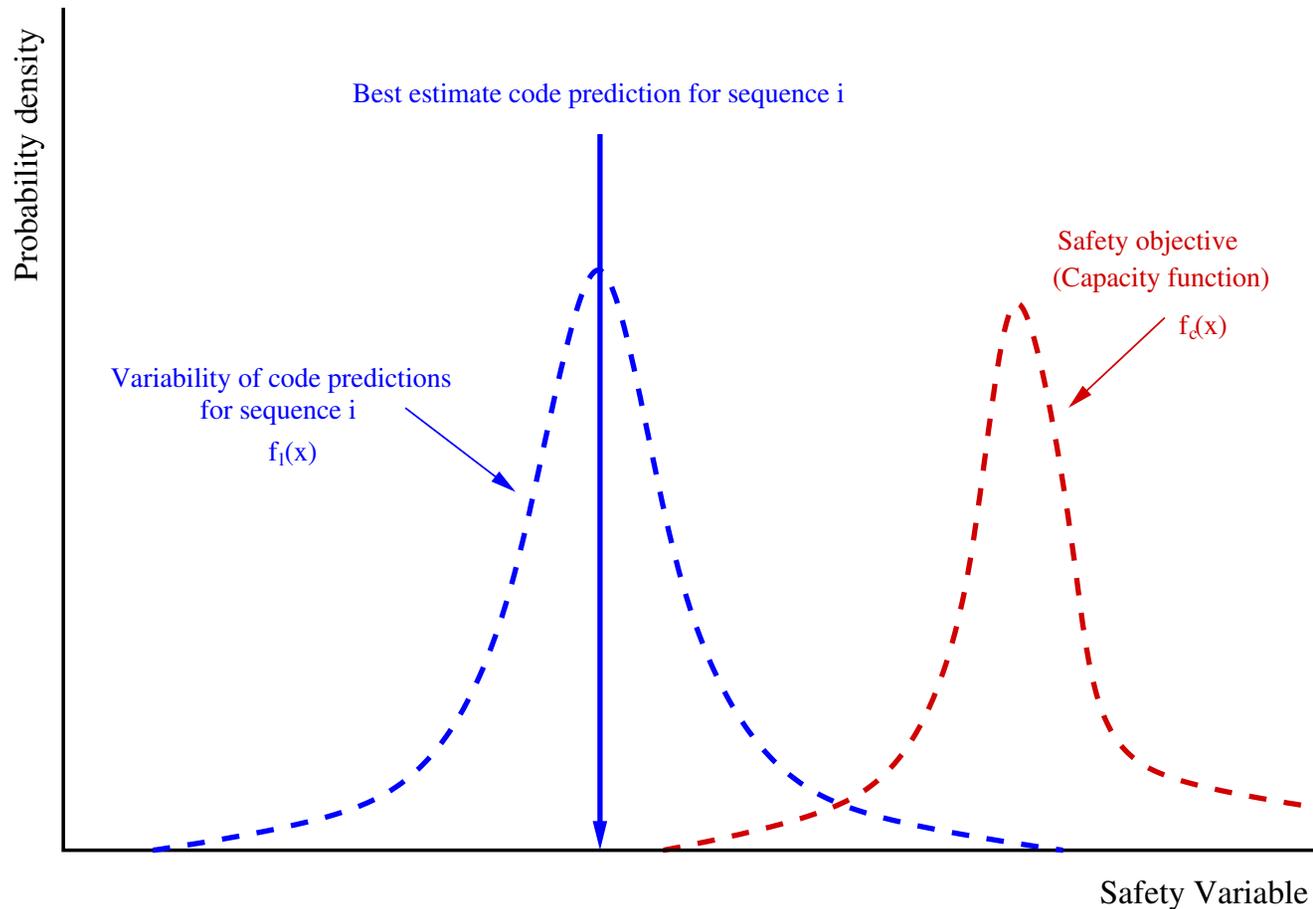
The SMAP framework results from an integration of deterministic and probabilistic methods:

- The **Design Basis Space is extended into the Risk Space**, described by PSA-like event trees.
- The PSA **sequence success criteria are extended** to include a set of **selected safety objectives** that should include the acceptance criteria used in Design Basis Transient Analysis.
- Risk Space sequences are analyzed using a **Best Estimate Plus Uncertainty** (BEPU) approach, typical of Design Basis Transient Analysis.
- **Safety margins** (more exactly, lack of them) for each sequence are evaluated in **probabilistic terms**.
- The final objective is to **evaluate exceedance frequencies** of the selected safety objectives.

## Probabilistic safety margins

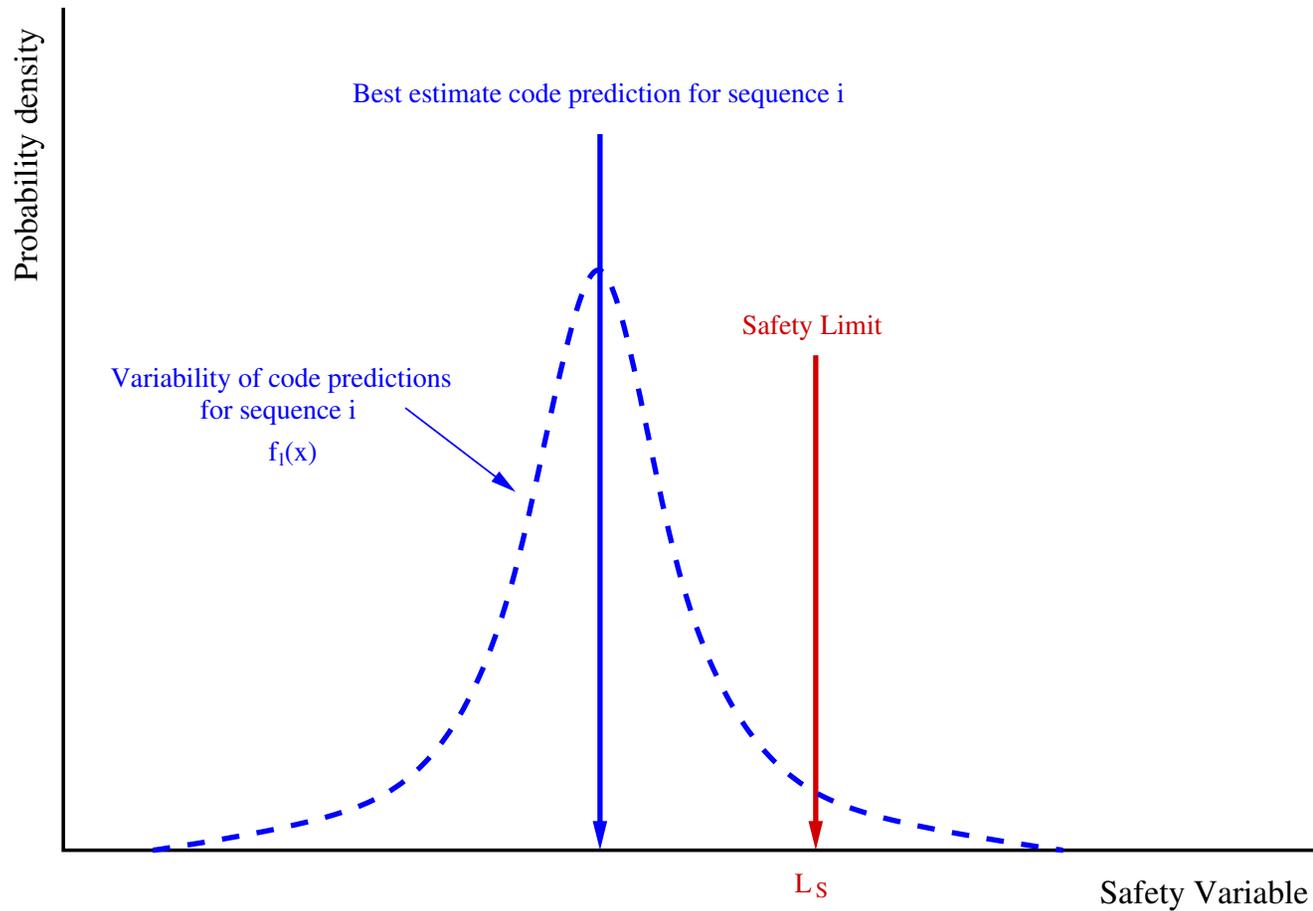


## Probabilistic safety margins



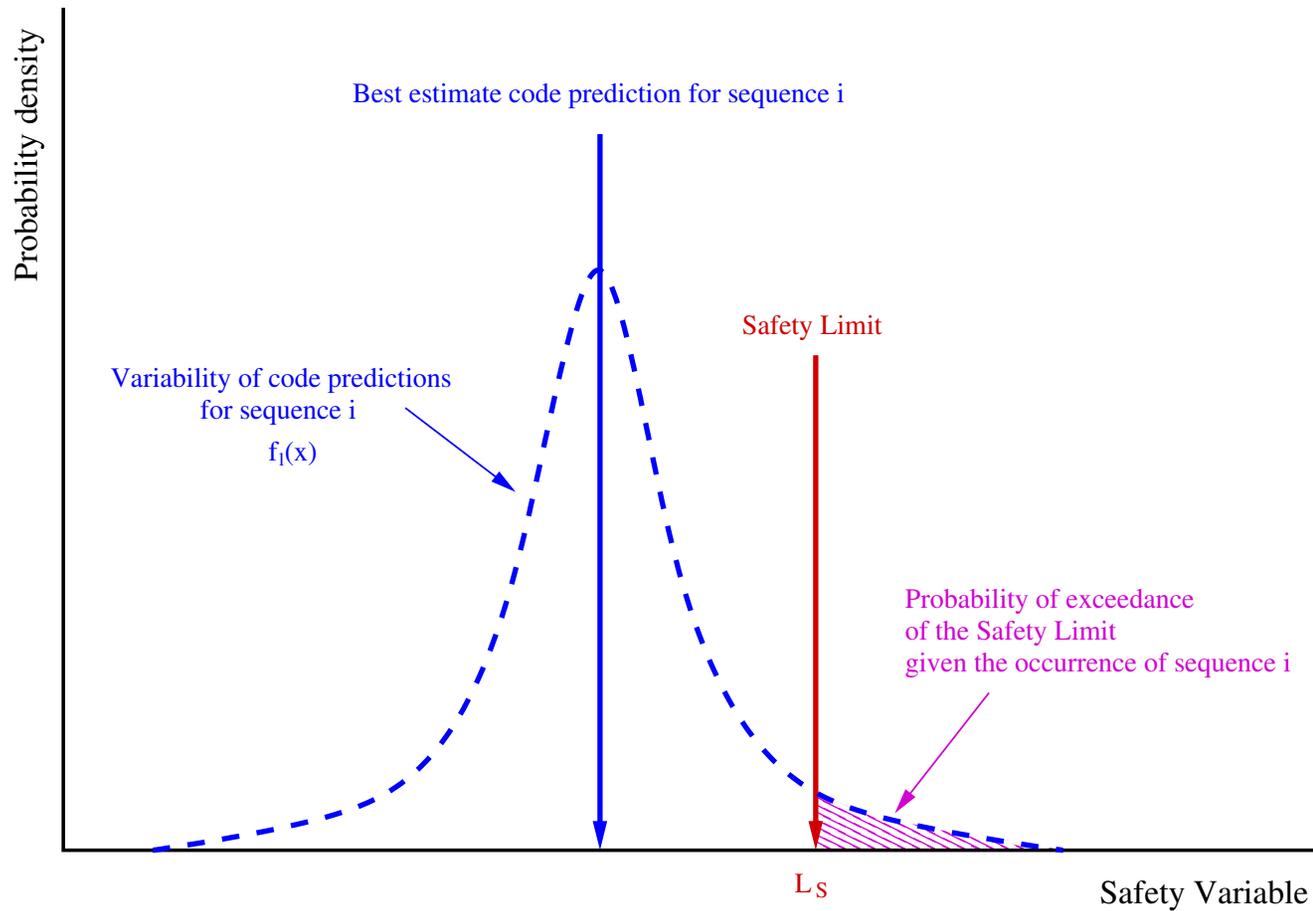
Failure probability: 
$$p(l > c) = \int_{-\infty}^{\infty} f_c(c) \left[ \int_c^{\infty} f_l(l) dl \right] dc$$

## Probabilistic safety margins



Failure probability: 
$$p(l > L_S) = \int_{L_S}^{\infty} f_l(l) dl$$

## Probabilistic safety margins



Failure probability: 
$$p(l > L_S) = \int_{L_S}^{\infty} f_l(l) dl$$

## Main results of SMAP

- The proposed framework provides a means for estimating the effect of **a broad range of plant modifications**.
- **SMAP integrates existing methodologies** for safety margins and risk evaluations. The resulting risk indicators include consideration of safety margins.
- **Risk indicators** are given as expected **frequencies of specified plant damage states** (limit exceedance frequencies).
- The proposed approach is **able to merge information** from all the relevant disciplines in regulatory decision-making.
- As new **specialized tools** become available, **improvement and optimization** of the methodology can be expected.

## Recommendations of the Task Group to CSNI

- For a wide scope implementation of the SMAP framework, **dynamic event tree simulation** could become necessary. It is suggested to launch a comparison exercise of existing DET simulation tools.
- In order to **extend the application field**, incorporation of **severe accident** analysis tools will be necessary. Replacement of currently used transient analysis codes or interfacing of these codes to severe accident ones are options to be considered.
- Extension to severe accidents may involve a significant **increase of (epistemic) uncertainties**. The consequences on the effectiveness of the methodology should be analyzed.
- On a longer term perspective, the SMAP framework could be applied in a **“technology-neutral” environment** by explicit use of **frequency-consequence curves**, avoiding the use of technology-specific safety limits (e.g., limits on DNBR or PCT).

# SMAP transition to SM2A

## SMAP final report

- The final report of the SMAP activities was published in 2007. It is available from the OECD/NEA website at:

<http://www.nea.fr/nsd/docs/2007/csni-r2007-9.pdf>

## Follow-up pilot study

- In June 2007 the CSNI initiated a follow-up Task Group to develop a pilot study applying the SMAP framework.
- The focus of the Task Group should be the assessment of the practicability of the SMAP framework.
- Activity must be short-lived: preliminary results requested for June 2009.
- The Task Group of Safety Margin Assessment Application (SM2A) started the activities in January 2008.

## Discussion of the mandate (1st. meeting)

- A **10% power uprate** was considered a good choice for the pilot application due to broad impact. Nevertheless, strong schedule requirements forced to introduce significant simplifications wherever possible.
- The **Zion NPP** was chosen as reference plant. It is in permanent shutdown, there are available simulation models and there is also a PSA model.
- In order to get a minimum coverage of the risk curves, it was initially proposed that **at least two limits**, namely **PCT** < 1204°C and **DNBR** > 1.3, should be considered.
- This intend was not possible due to strong limitation of the term of the mandate.
- **Only the PCT** limit was finally included in the study.

## Overview of the applied procedure

1. **Define the power uprate** method: flattening core power profile, constant core flow and cold leg temperature.
2. **Take Zion PSA event trees** as starting description of the Risk Space.
3. **Review Zion event trees** to identify sequences potentially more affected by the power uprate.
4. **Discard sequences** of very low frequency: arbitrary threshold set at  $10^{-7}$  for SM2A.
5. **Refine PSA sequences** to associate each one to a non-ambiguous simulation scenario (use of system fault trees).
6. **Calculate the conditional exceedance probability** for each sequence of interest using BEPU methods.

# SMAP transition to SM2A

## Event trees considered

- The number of analyzed event trees was limited, due to the number of participating organizations and the available time.
- The following event trees were found more likely to be affected by the change. They were assigned to the indicated Organizations:
  - Loss of Offsite Power (CNSNS-Mexico, IRSN-France).
  - Steam Line Break (STUK-Finland, GRS-Germany).
  - Loss of Service Water / Component Cooling Water (CSN-Spain).
  - Large Break LOCA (EDF-France, NRI-Czech Republic).
  - Medium Break LOCA (PSI-Switzerland).
  - Small Break LOCA (PSI-Switzerland).
  - Loss of Main Feedwater (NRC-United States).
  - Steam Generator Tube Rupture (KAERI, KINS - Korea).
  - Turbine Trip (JNES-Japan).

# SMAP transition to SM2A

## Results and their significance

- All the participants **applied the SMAP principles** to analyze the assigned event trees.
- However, **each participant** was allowed to choose the **simulation tools** and the **specific approach to BEPU** analysis.
- This variety of methods and data resulted in non-homogeneous results. Although each participant provided consistent data, final aggregation of the results was not recommended.
- The advantage is that **different possible approaches were tested**. This is considered a value of SM2A, although explicit conclusions have not been drawn.
- Final report finished on October 2010 and approved by CSNI on December 2010. Still to be published.

## Main conclusions of SM2A

- The **SMAP framework** has been shown **feasible**, even though the SM2A exercise had to deal with significant limitations.
- Several areas of refinement or **enhancements to SMAP** were identified, e.g., screening, event tree modeling, sequence aggregation and separation of uncertainties.
- Building teams of expert analysts, **understanding both the probabilistic and the deterministic** safety analysis **is a need** for applying the SMAP framework.
- Usefulness of the application of **dynamic event tree tools** was identified. They would provide for a **significant improvement** of the methodology
- Modeling of **time uncertainties** (e.g., human actions) has been found of **particular importance**. Sequences involving such actions tend to be **dominant contributors**.

# **CSN contribution: Application to loss of CCW sequences**

## Implementation of the task

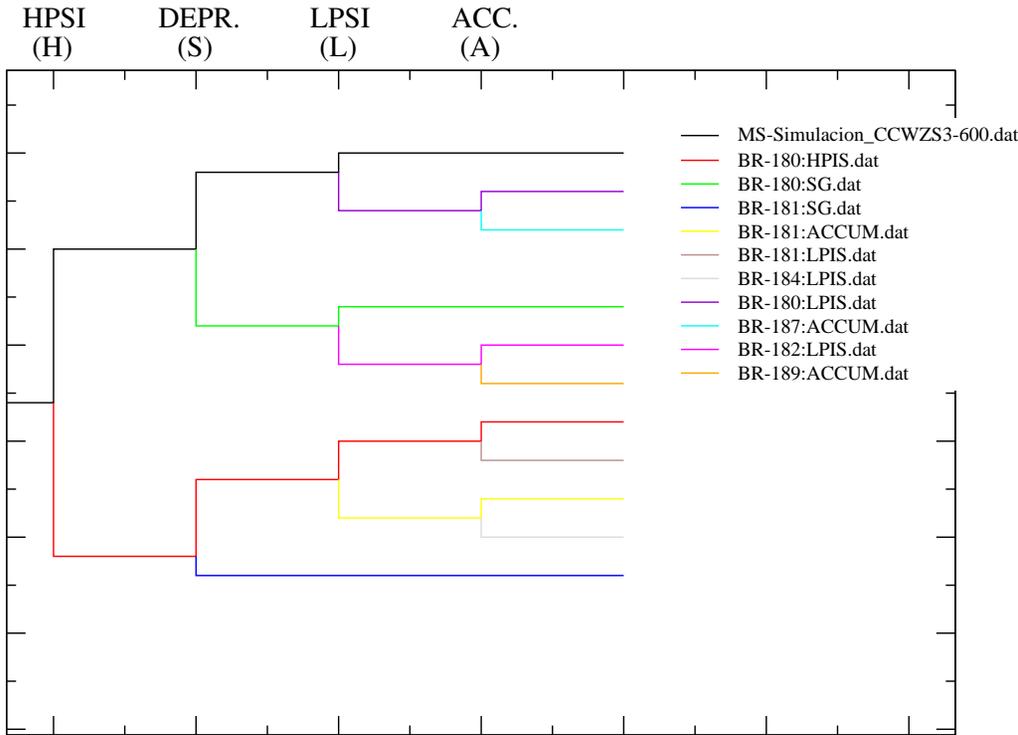
- The CSN contribution was developed in close **collaboration** with **UPM** and **Indizen**.
- **Dynamic event tree simulation** capabilities of **SCAIS** have been used and assessed.
- Simulations were performed with **Dendros-Babieca-MAAP** and confirmed with MAAP standalone.
- Alternative uncertainty analysis approach based on “**damage domains**” for time uncertainties.
- Significant feedback obtained for the development of the **Path Assessment** and **Risk Assessment** modules of **SCAIS**.

# Application to CCW sequences

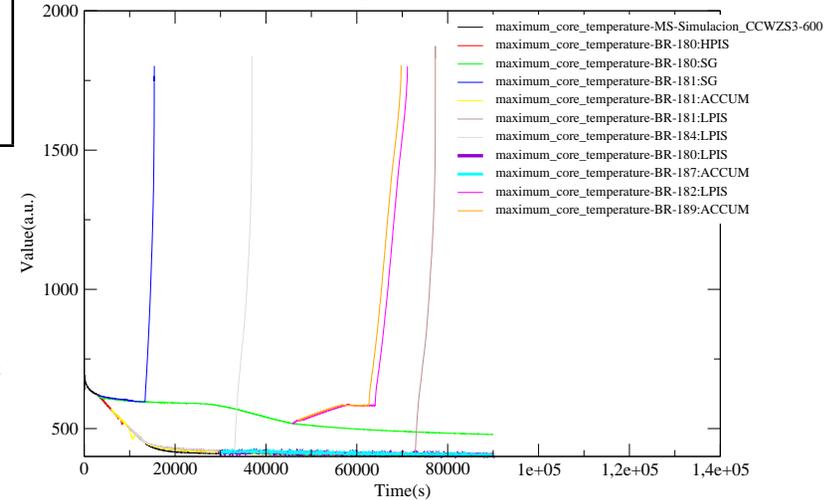
## Initial dynamic event tree (SCAIS)

Dynamic event tree for loss of CCW with reactor trip (K), AFW (F), seal LOCA (B) and CCW recovery (R).

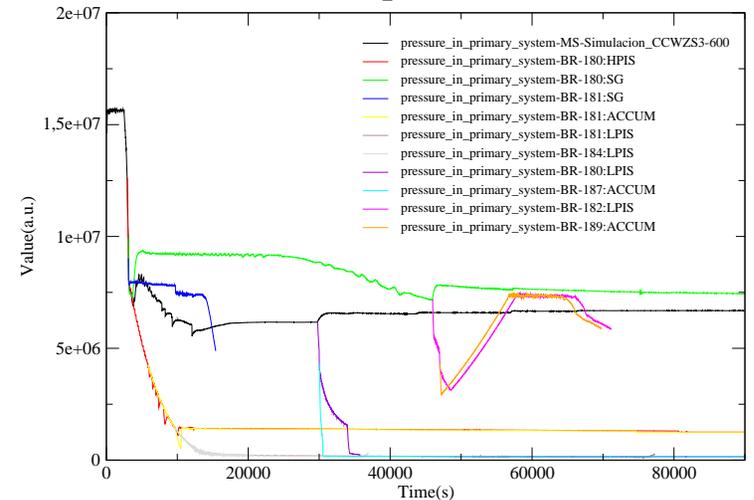
Dendros Process:  
Test\_CCWZS3-600



Dendros Process:  
Test\_CCWZS3-600



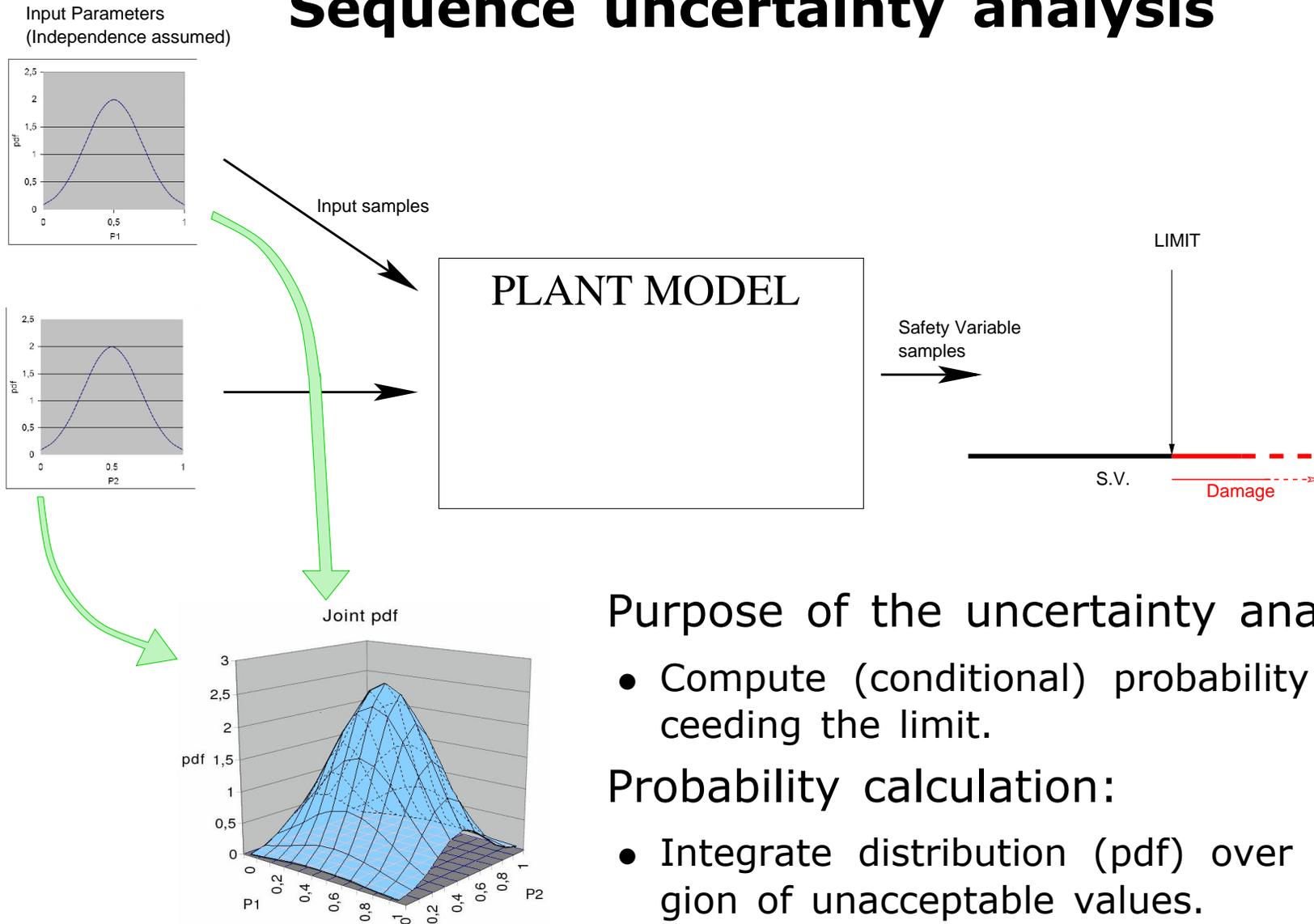
Dendros Process:  
Test\_CCWZS3-600



## Selection of sequences:

- After initial screening the analysis focused on **sequences without system failures** due to high frequency threshold.
- Only sequences with **seal LOCA** were analyzed.
- **Three uncertain times** were considered:
  - Occurrence of the **seal LOCA**
  - **Manual depressurization** and cooling through steam generators.
  - **Recovery** of the CCW system
- **Time uncertainties** were expected **dominant**. Model parameter uncertainties were not taken into account.

## Sequence uncertainty analysis



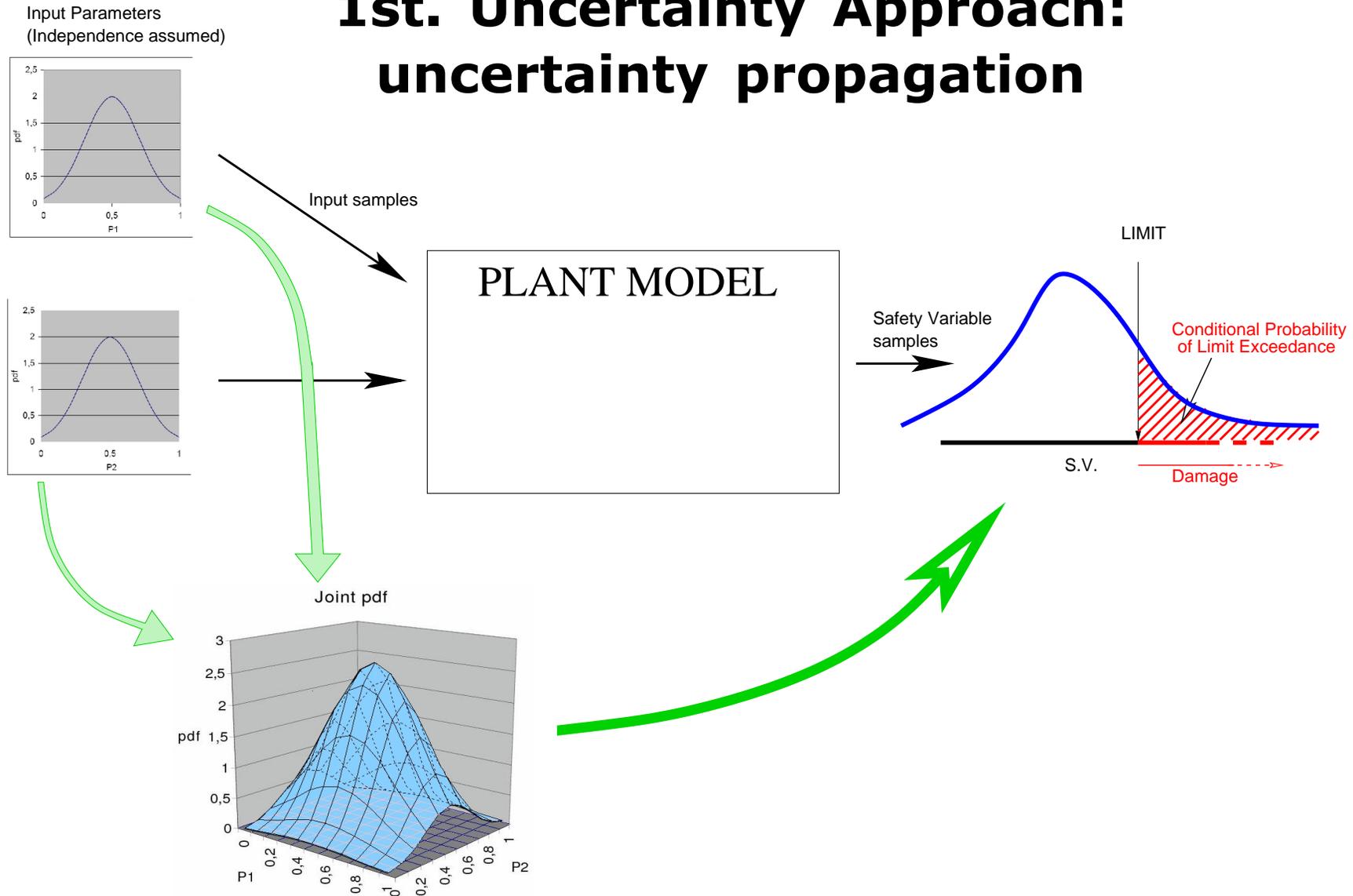
Purpose of the uncertainty analysis:

- Compute (conditional) probability of exceeding the limit.

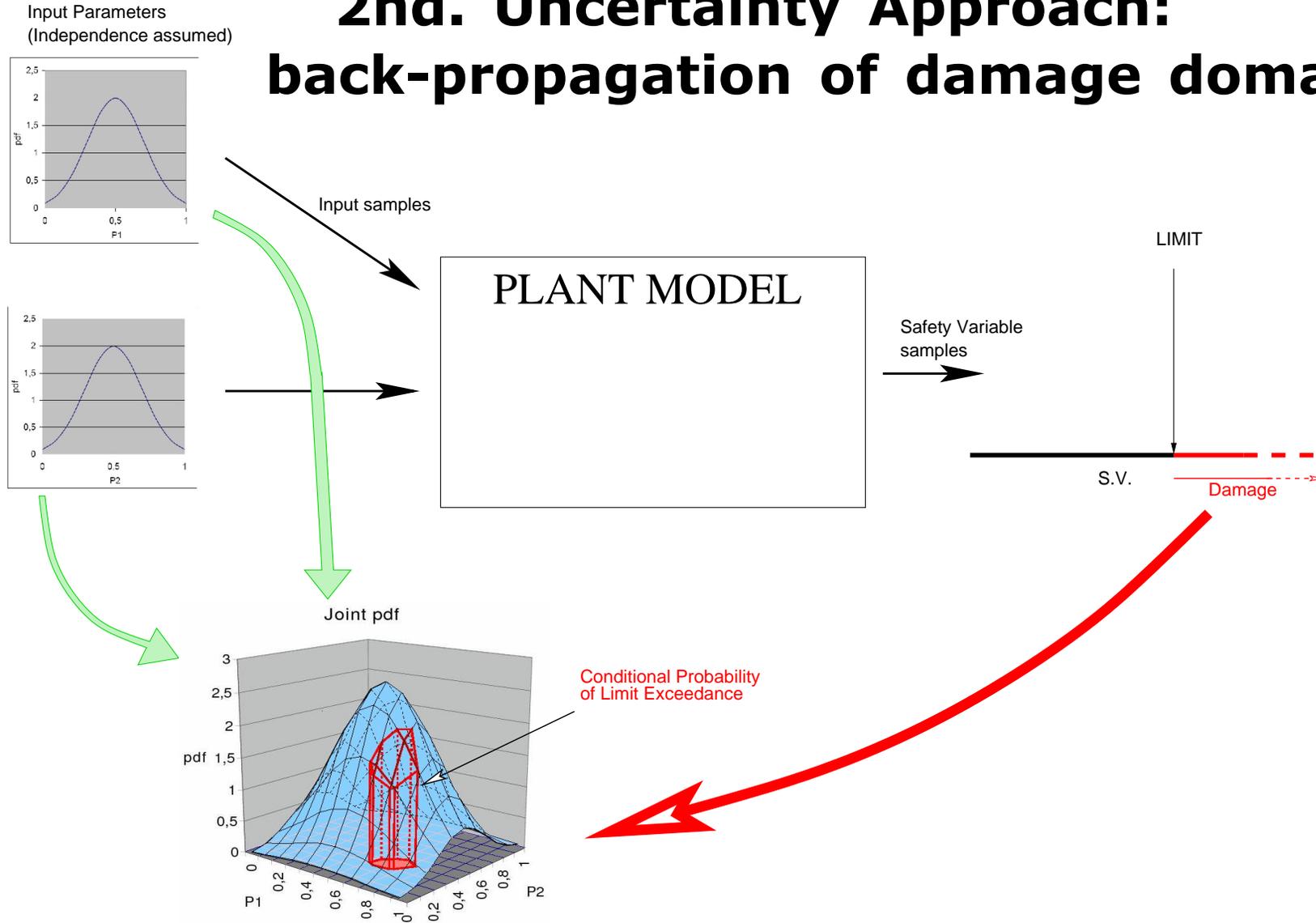
Probability calculation:

- Integrate distribution (pdf) over the region of unacceptable values.

## 1st. Uncertainty Approach: uncertainty propagation

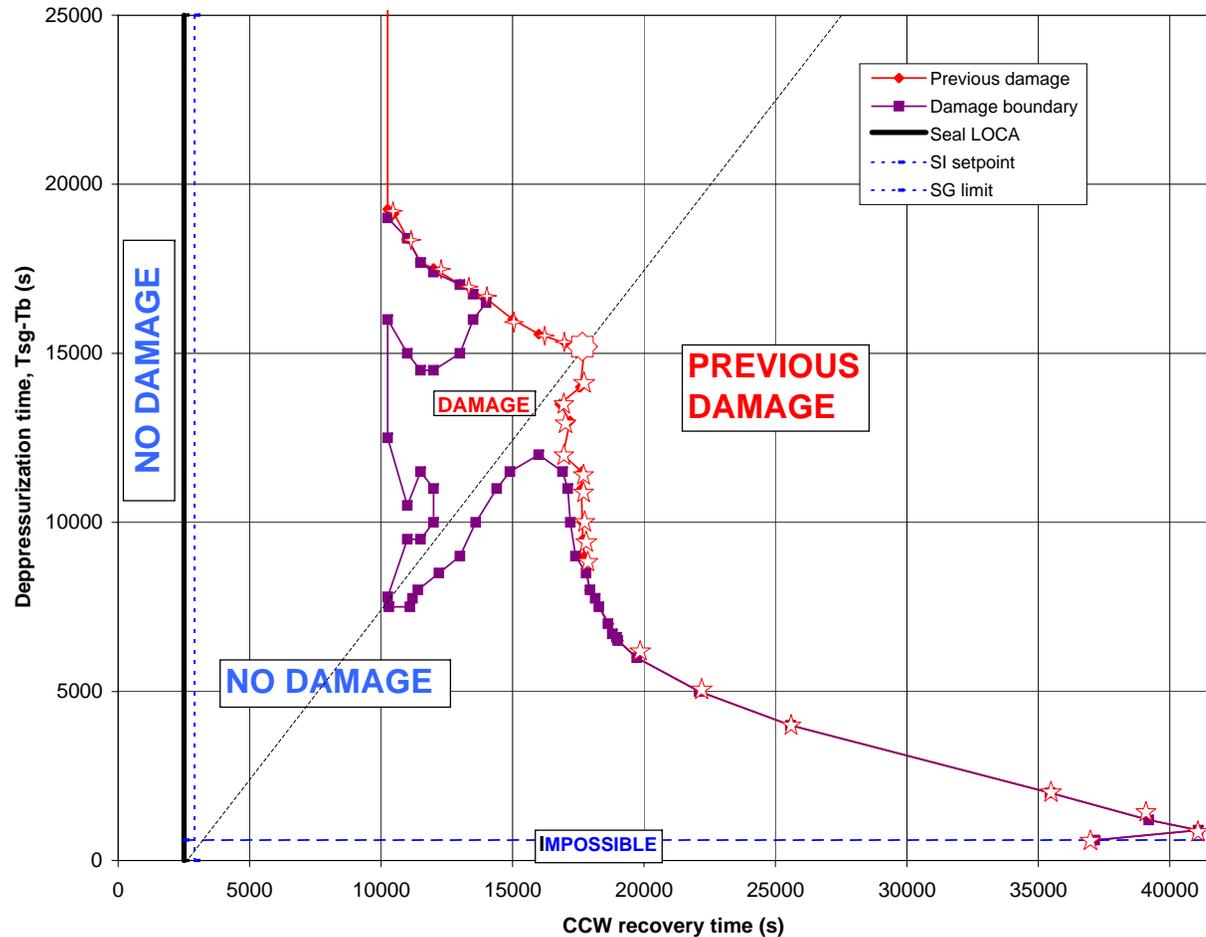


## 2nd. Uncertainty Approach: back-propagation of damage domain



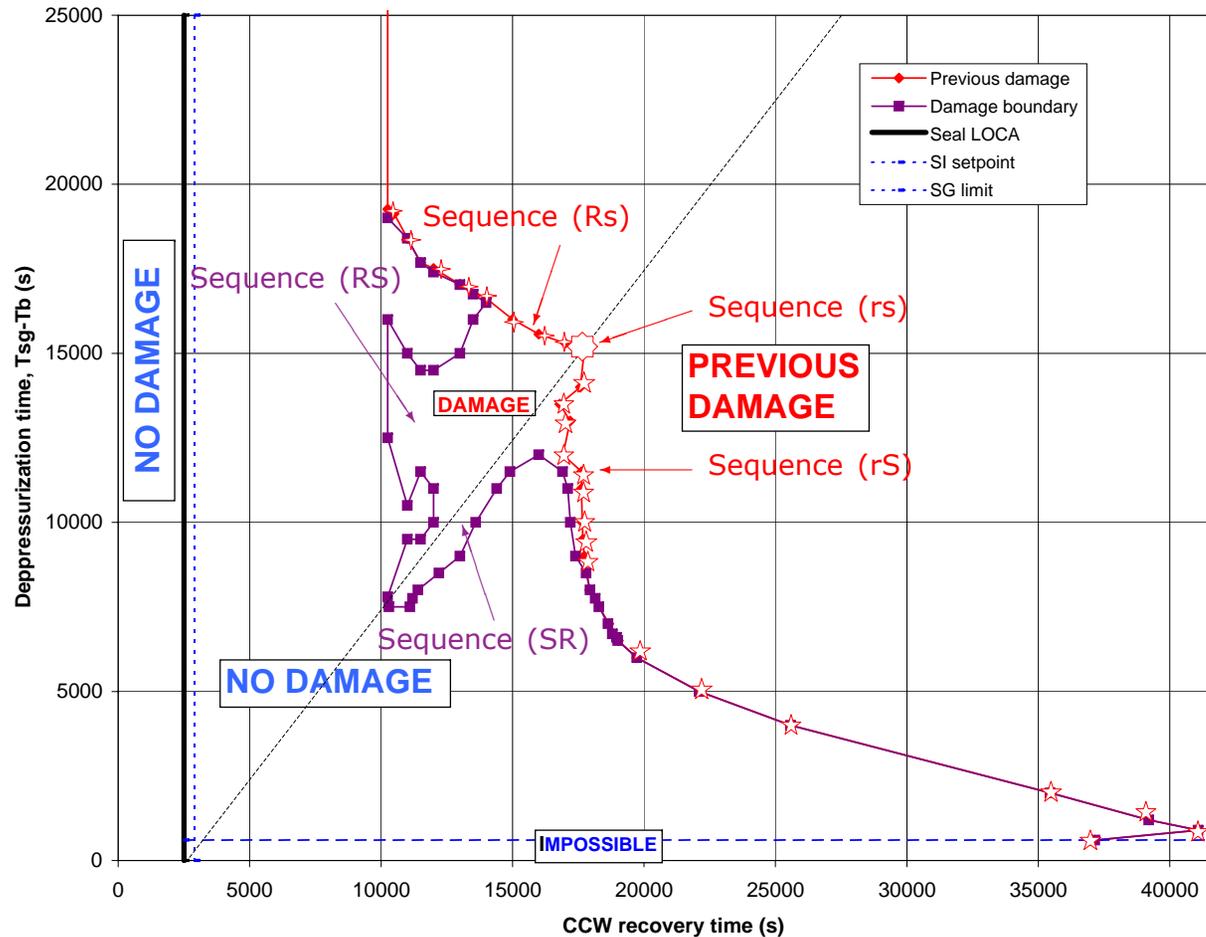
## Damage domains of loss of CCW sequences

Damage domain is 3-D. Figure represents a 2-D section for  $t_{LOCA} = 2500s$



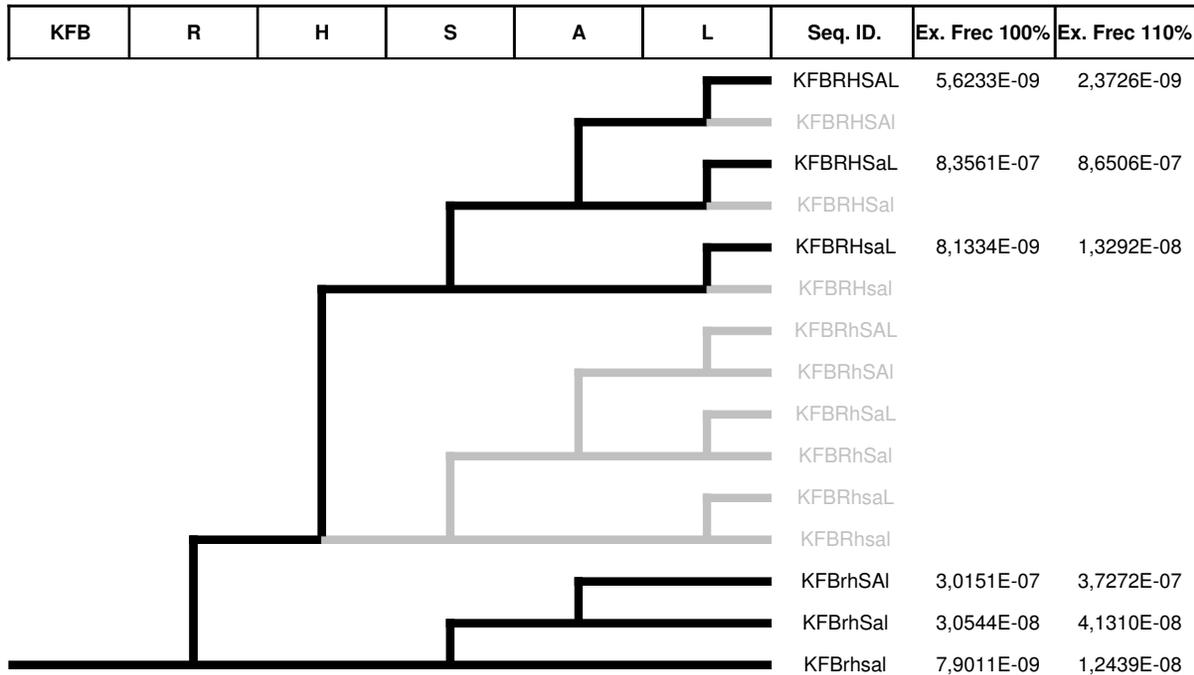
## Damage domains of loss of CCW sequences

Damage domain is 3-D. Figure represents a 2-D section for  $t_{LOCA} = 2500s$



# RESULTS

## Quantification of dynamic sequences



AGGREGATION		
Contribution of analyzed sequences:	1,1893E-06	1,3072E-06
Contribution of non-analyzed sequences: - Sequences with recirculation failure:	1,5002E-07	1,5002E-07
<b>TOTAL Calculated Exceedance Frequency</b>	<b>1,3393E-06</b>	<b>1,4572E-06</b>
Relative increment:		8,8 %

## Short and medium term activities

- Confirmation and refinement of damage domains and exceedance frequency **using TRACE**.
- Use of **SM2A results** as a benchmark for next **SCAIS developments**:
  - Automatization of the **time uncertainty** analysis.
  - Connection with **parametric uncertainty** analysis methods.
  - Incorporation of **probabilistic quantification** methods.
- **Other applications** of SMAP: other limits (DNBR, containment), severe accidents...



Questions?  
Comments?

# **Equipos de detección dinámica**

**Juan Antonio González**

***CEDEX***

## **ÍNDICE**

**Equipos dinámicos de detección de muestras radiactivas**

**Situación actual**

**Avances del proyecto**

**Funcionamiento básico de los pórticos para vehículos**

**Conclusiones obtenidas en la calibración de los pórticos**

# Equipos Dinámicos de Detección de Muestra Radiactivas

---

Juan A. González  
U. Politécnica de Madrid  
E.T.S.I. Caminos C y P.  
Lab. Ing. Nuclear

3 de Marzo de 2011

Equipos Dinámicos de Detección - 2011 - Madrid

## 1.- Equipos dinámicos de detección de muestras radiactivas

---

### Objetivo

- **Detectar muestra en movimiento con emisiones radiactivas:**
  - **Emisiones gamma y beta. Muestra huérfanas, mezcladas con materiales.**
    - En la industria del reciclado del metal y urbano, y en fronteras.
  - **Emisiones de neutrones. Muestras ilícitas, y de U o Pu para explosivos.**
    - En las fronteras y puntos estratégicos: terrorismo nuclear

### Características particulares

- **Detectores:**
  - **Buena eficiencia: De centelleo plástico. ( PVT o PSR).**
    - Con una gran superficie y pequeño espesor. (0,3 a 0,5 m<sup>2</sup>)
  - **Varios detectores. (1 a 8 de NaI(Tl) o GeHP). Ángulo Sólido**
    - Colocados rodeando la zona sensible de detección.
- **Electrónica digitalizada:**
  - **Señales de los fotomultiplicadores optimizadas.**
    - Alta tensión, amplificador y discriminador integrado.
    - Microprocesador de recuento para intervalos de 20 a 100 ms.
  - **Control continuo y gestión externa con USV y Ethernet.**
- **Ordenador de control:**
  - **Gestión de medidas y procesos con varios niveles y esquema.**
    - Medida del fondo continua.
    - Medida de vehículos, muestras cargas especiales

## 2.- Situación actual

### Acuerdo entre UPM CSN y ENRESA

- La UPM, ENRESA y el CSN firman el 5 de Mayo de 2009 un Acuerdo de Colaboración hasta el 2011 para participar en el Proyecto de Investigación sobre:
  - **Sistemas de detección dinámica de material radiactivo mezclados con otros materiales con equipos fijos y móviles.**
  - Dentro del marco de la aplicación del Protocolo para la vigilancia radiológica de los materiales metálicos y de la iniciativa MEGAPORT de cooperación en la prevención del tráfico ilícito de material nuclear y otro material radiactivo

### Situación Actual Del Proyecto

- **Equipos dinámicos con detectores de PVT**
  - Se han realizado los ensayos estáticos y dinámicos de espectrometría con PVT:
    - En dos pórticos, con 5 muestras calibradas, en puntos de los ejes X, Y, Z.
    - En un pórtico para evaluar la autoabsorción con plástico, aluminio y hierro.
  - Se han adquirido y montado 4 equipos dinámicos de PVT:
    - PVT de 2"x2", 3 detectores de 60x40x5 cm y 2 detectores de 180x40x5 cm.
- **Equipos dinámicos con detectores de NaI(Tl).**
  - Se han realizado los ensayos estático y dinámicos de espectrometría con NaI(Tl):
    - En tres equipo con detectores de 2"x4"x16", y con 5 muestras calibradas.
    - En 1 detector de NaI(Tl) de 4"x4"x16" de Exploranium, en 2 detectores de NaI(Tl) de 2"x4"x16" de Mirion, y en 2 detectores de NaI(Tl) del Laboratorio.
  - Se han adquirido 4 detectores de NaI(Tl) de 2"x4"x16", con su electrónica digital.

EC-1-Equipos Dinámicos. Nº - 2

Equipos Dinámicos de Detección – 2011 - Madrid

### 2.1 – Documentación general de los pórticos.

- **1- Normativa de los Pórticos.**
  - ANSI-N42-35:2006, ANSI-N42-38:2006, IAEA-TS-1-1240:2006 y CEI-IEC-62244:2006.
  - Reglamento de Holanda, y de la UNECE.
- **2- Descripción de los pórticos.**
  - Componentes, parámetros y características operativas.
  - Medidas: fondo, eficiencia, niveles de alarma y valores límites.
- **3- Descripción de los pórticos del Laboratorio.**
  - Thermo Eberline FHT-1388, Exploranium AT-980 y Canberra RadSentry.
- **4- Ensayos de campo internacionales.**
  - SMA (USA), CMI (Chequia), UPM (Milan), Exploranium (Canada), RIVM (Holanda), Nevada (USA).
- **5- Descripción general de los ensayos de verificación y calibración (con Cs-137).**
  - Medidas de la eficiencia estática y dinámica, parámetros límites y niveles de alarma.
- **6- Atenuación de los espectros.**
  - Atenuación y optimización de los espectro y de las ventanas de medida.

EC-1-Equipos Dinámicos. Nº - 3

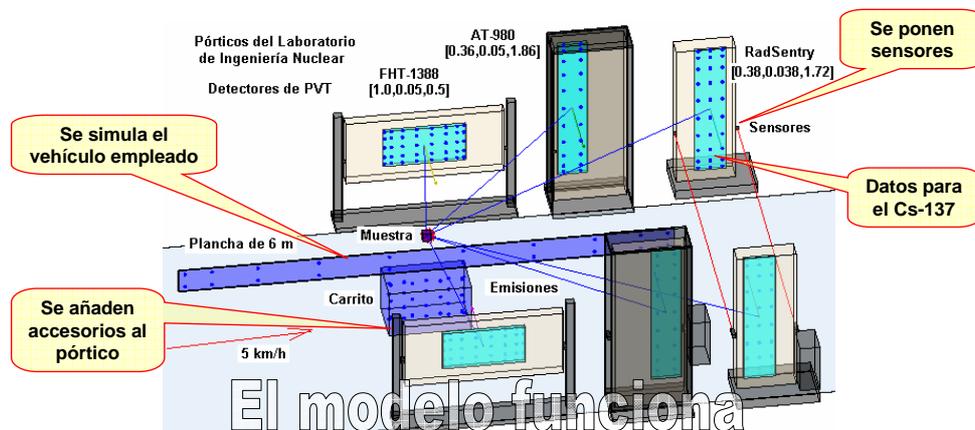
Equipos Dinámicos de Detección – 2011 - Madrid

## 2.2 – Modelo numérico de pórticos.

- - **Modelo operativo a nivel conceptual.**
  - Escrito en MatLab, y operativo en tiempo real.
  - Alimentado con los datos obtenidos en los ensayos de calibración.
- - **Validado para los ensayos realizados con Cs-137 en el laboratorio.**
  - Reproduce los ensayos de calibración del Laboratorio.
  - Reproduce los ensayos de calibración de los pórticos del sector del Metal.
- - **Datos de entrada iniciales sencillos y gráficos.**
  - Entorno geométrico del vehículo, su carga, la muestra y la velocidad.
  - Entorno geométrico de los detectores y de la calzada.
  - Parámetros físicos de absorción gamma y de eficiencia intrínseca.
  - Parámetros de medida del pórtico y de los algoritmos empleados.
- - **Resultados obtenidos.**
  - Simulación de la atenuación del fondo por la carga del vehículo.
  - Generación de las detecciones primarias de los detectores.
  - Generación de alarmas con diferentes algoritmos numéricos.

### 2.2.1.- Modelo dinámico para los pórticos del laboratorio

- **Se hace el modelo de:**
  - Los tres pórticos del laboratorio.
  - Fondo y eficiencia para Cs-137
  - FV entre muestra-detector a 2.2 m.
- **Resultados esperados en la simulación :**
  - Detecciones en el límite de detección
  - Distribución de resultados en 1000 ensayos.
  - Variación de los resultados con la velocidad.



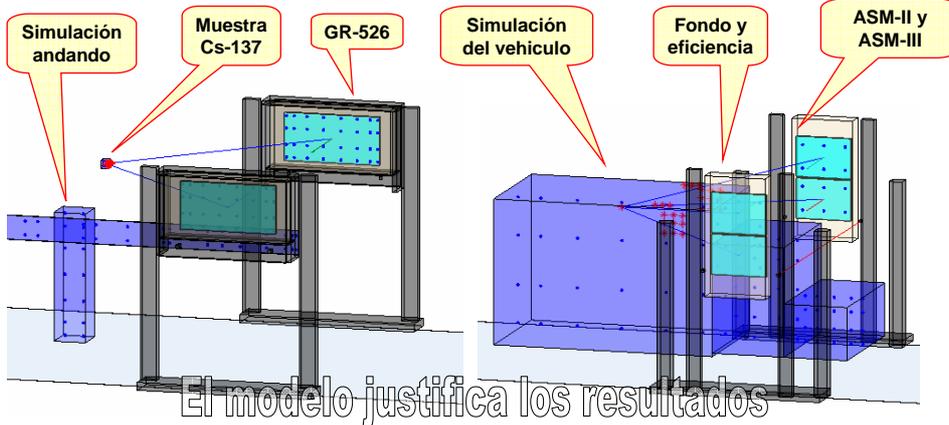
### 2.2.2.- Ensayos realizados en pórticos operativos externos

**• Paso de la muestra de Cs-137:**

- Andando y en vehículo a 5 km/h.
- En 25 pórticos externos (8 modelos)
- Simulados los resultados de 3 modelos.

**• Explicación de resultados:**

- Andando y vehículo.
- Modelos diferentes.
- Resultados coherentes



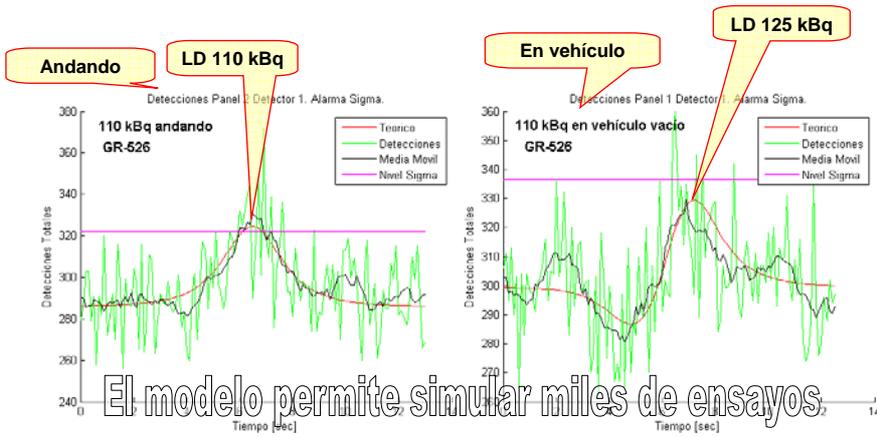
### 2.2.3- Espectros temporales andando y en vehículo

**• Comparan los resultados:**

- Andando no hay atenuación.
- El LD está mas bajo.

**• Espectro temporal en vehículo:**

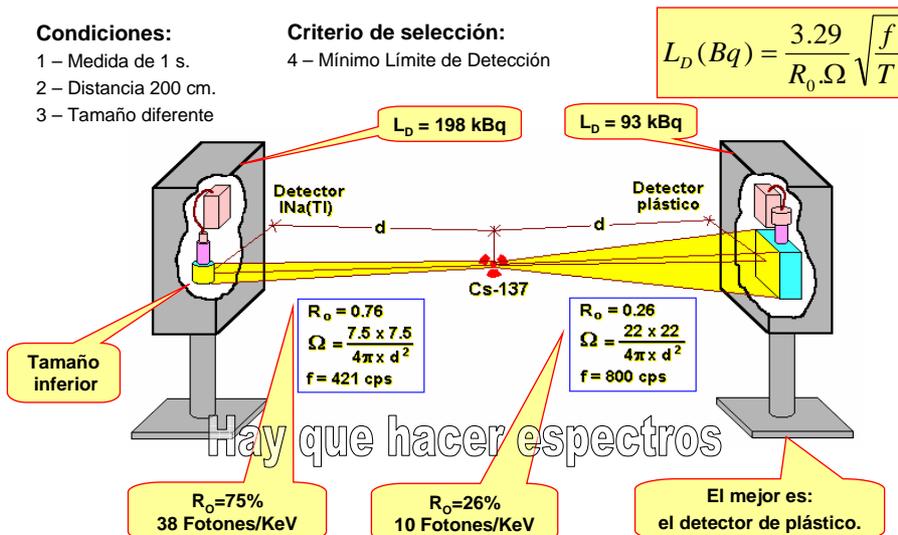
- Coincide con la experiencia.
- El LD se incrementa un 10 o 15 %.



### 3.- Avances del proyecto

Estado del arte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DETECTORES DE CENTELLEO PLÁSTICO DE GRAN SUPERFICIE.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipos desarrollados en el PNNL (<i>Pacific Northwest National Laboratory</i>).</li> <li>• Avances y limitaciones de la espectrometría</li> </ul> </li> <li>• <b>DETECTORES DE NaI(Tl) DE GRAN VOLUMEN.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipos desarrollados por 6 casas comerciales.</li> <li>• Estabilidad, calibración, adición y algoritmos.</li> </ul> </li> </ul>
Ensayos Con Equipos Dinámicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DETECTORES DE CENTELLEO PLÁSTICO DE GRAN SUPERFICIE.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se ha completado la calibración con espectrometría, con nuevos parámetros de calibración en energía, resolución y eficiencia.</li> <li>• Se tienen detectores de PVT, con multicanales digitales, y programas</li> </ul> </li> <li>• <b>DETECTORES DE NaI(Tl) DE GRAN VOLUMEN.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se han calibrado el equipo de Exploranium, Mirión y el del LIN.</li> <li>• Se tienen detectores de NaI(Tl), multicanales digitales y programas.</li> </ul> </li> </ul>

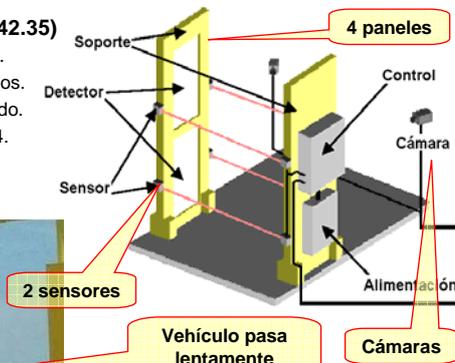
#### 3.1.- Comparación inicial entre el detector de NaI(Tl) y de PVT



### 3.1.1- Pórticos instalados en las fronteras de PVT.

- **Pórtico diseñado para fronteras. (ANSI-N42.35)**

- Detectores de PVT y de He-3 para neutrones.
- Desde 1 a 8 paneles para personas o vehículos.
- Varios ordenadores: control local y centralizado.
- También han de superar la Norma CEI-62244.
  - Detección inferior a 600 kBq (Cs-137)
  - Detección de Co-57, Ba-133 y Cf-252.



2 sensores

Vehículo pasa lentamente

Si hay alarma pasa por la segunda línea

Hay muchas alarmas de isótopos naturales y médicos

Cámaras

### 3.1.1.1- Ejemplos de pórticos para vehículos en fronteras

- **Detección en las fronteras.**

- Para vehículos, trenes y carga.
- También detectores de neutrones

- **Riesgo potencial.**

- Muestras ilícitas: U y Pu.
- Muestras huérfanas.

En mega puertos

Entrada y salida



Puerto de contenedores

Sencillo

Rápido

Eficiente

2 paneles en cada lado

4 paneles en cada lado



### 3.1.2.- Pórticos para vehículos con espectrometría.

- **Pórtico para fronteras. (ANSI-N42.38)**

- Detectores de NaI o GeHP.
- Para la segunda línea.
- También realiza medidas estáticas.
  - Detectores de NaI(Tl). 4 en el panel
  - Detectores de GeHP. 4 a 6 en el panel.



Ensayados en Nevada

Selección:  
2 de NaI(Tl),  
1 de GeHP

4 NaI(Tl) de  
40x10x10 cm

Equivalente a  
PVT 186x36x5 cm

Identifica  
isótopos

No tiene alarmas  
inocentes

6 GeHP por panel

Sin N líquido

Operación en el  
"Control Box"



Solo se conocen los resultados.

### 3.2.1- Espectros del detector de PVT y zonas

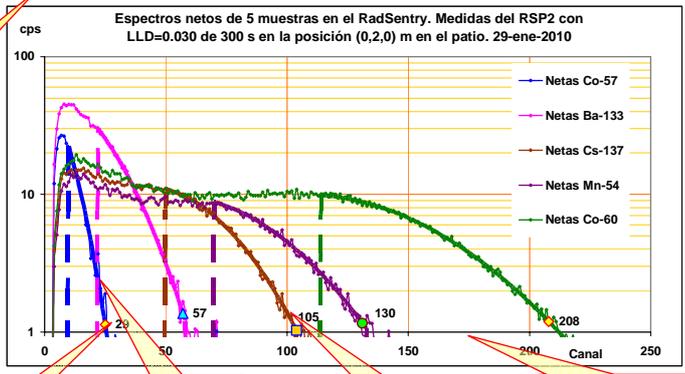
**Condiciones:**

- 1 - Medida de 1 s.
- 2 - Distancia 200 cm.
- 3 - Tamaño 172 x 32x 5 cm

**Criterio de selección:**

- 4 - Mínimo Límite de Detección Medido

$$L_D (kBq) = \frac{3.29}{R_0 \cdot \Omega} \sqrt{\frac{f}{T}}$$



Tamaño  
muy  
grande

$L_D = \text{varia}$

$L_D = 45 \text{ kBq}$

$L_D = 186 \text{ kBq}$

El PVT es mas económico  
y se puede mejora

### 3.2.2- Espectros del detector de NaI(Tl) y zonas

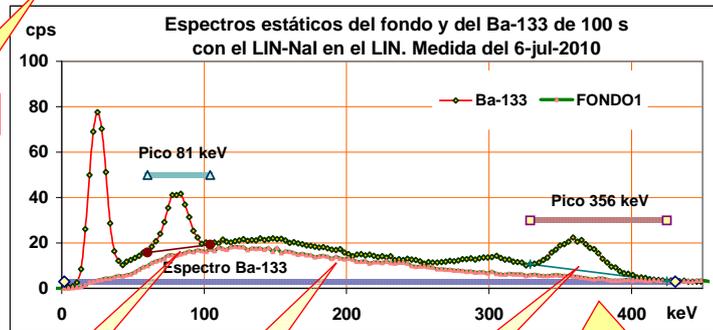
**Condiciones:**

- 1 – Medida de 1 s.
- 2 – Distancia 200 cm.
- 3 – Tamaño 3 o 4 de 2"x4"x16"

**Criterio de selección:**

- 4 – Mínimo Límite de Detección Medido

$$L_D (kBq) = \frac{3.29}{R_0 \cdot \Omega} \sqrt{\frac{f}{T}}$$



Varios detectores

$L_D = 192 \text{ kBq}$

$L_D = 80,3 \text{ kBq}$

$L_D = 186 \text{ kBq}$

El NaI(Tl) puede competir pero tiene un coste superior

### 3.3.- Evolución de los detectores de plástico.

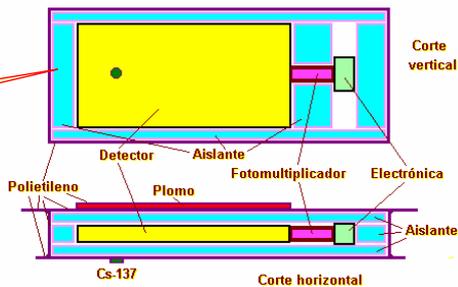
**El panel protege a los detectores:**

- 1 – Cada panel tiene 1 o 2 detectores de PVT
- 2 – Tienen blindaje trasero de plomo o hierro.

Corte de un panel

**Medida de la señal:**

- 1 – Tienen 1 PMT y una ventana
- 2 – Mejora con 2 PMT, coincidencias y estabilizadores.
- 3- Varias ventanas y algoritmos nuevos



Con 2 detectores



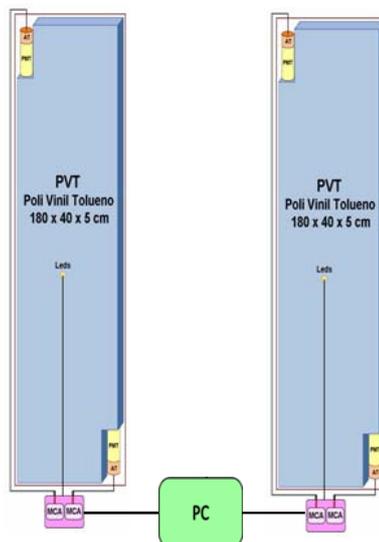
Con 1 detector



Lim. Det. igual a 4 NaI(Tl) de 3"x3"

### 3.3.1.- Mejoras en los pórticos de PVT.

- En nuevo equipo tendrá:
- Detectores de PVT:
  - De 180x40x5 (Comerciales)
  - 2 PMT integrados.
- Multicanales en cada PMT.
  - Digital (comercial)
- Programa de adquisición de espectros cada 100 ms.
  - Se definen de 8 a 16 zonas.
- Algoritmos detección con dos niveles:
  - Sigmas (normal)
  - SPRT (bayesiano)
- Multicanales en cada PMT.
  - Digital (comercial)
- Estabilizadores digitales leds



### 3.4- Evolución de los detectores dinámicos de NaI(Tl)

#### Equipos comerciales

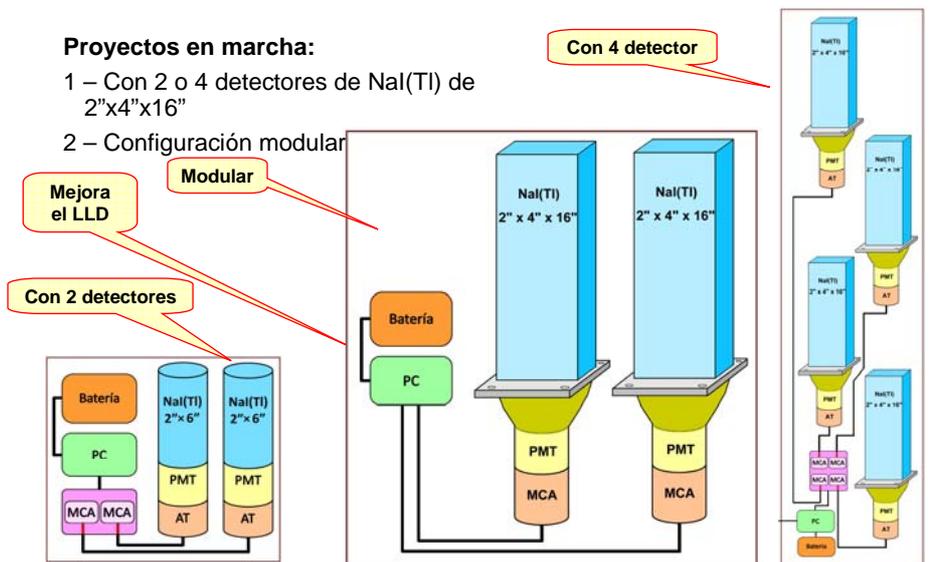
- 1 – Mejoras en la programación.
- 2 – Mejoras en la suma y coincidencia de espectros



### 3.4.1- Mejoras de los equipos dinámicos de NaI(Tl).

#### Proyectos en marcha:

- 1 – Con 2 o 4 detectores de NaI(Tl) de 2"x4"x16"
- 2 – Configuración modular

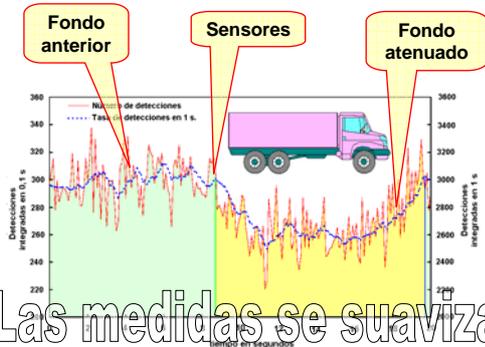
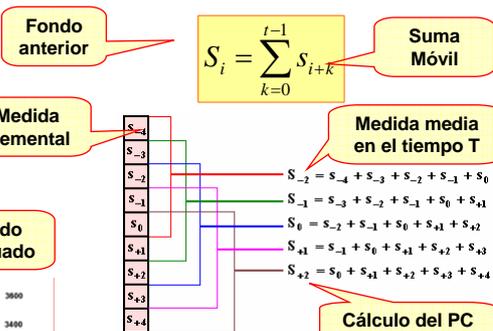


EC-1-Equipos Dinámicos. Nº - 18

Equipos Dinámicos de Detección – 2011 - Madrid

### 4.- Funcionamiento básico de los pórticos para vehículos

- **Fondo del pórtico para vehículos:**
  - Se mide antes entre 10 y 30 s.
- **Los sensores de vehículos:**
  - Miden su velocidad.
- **Durante el paso del vehículo:**
  - Se atenúa el fondo.
  - Las medidas son próximas a 1 s.



- **El fondo antes del paso del vehículo:**
  - Es el obtenido antes. (5 s,  $T_T=30$  s).
- **La medida total en el vehículo.**
  - Es el obtenido en  $T_T=0,1$  s y en  $T_T=1$  s.
- **Después del paso del vehículo:**
  - Se obtienen las detecciones netas.
  - Se analiza la medida con la suma móvil.

Las medidas se suavizan con la suma móvil

EC-1-Equipos Dinámicos. Nº - 19

Equipos Dinámicos de Detección – 2011 - Madrid

#### 4.1.- Funcionamiento cuando hay una muestra en el vehículo.

- **Después de pasar el vehículo:**
  - El PC analiza las detecciones netas.
- **Las detecciones tienen una dispersión:**
  - Desviación típica = Raíz del fondo.
- **Se fija el nivel de alarma como  $N_A$ :**
  - El cálculo varía en cada pórtico.
  - Hay diferentes fórmulas de cálculo
- **Si se supera el nivel de alarma:**
  - Se activa la alarma de detección.

El tiempo varía

$$C.t = F.t \pm N.\sqrt{F.t}$$

Para el 95 %  $N=2$

Fondo diferente

$N_A=3,5$  para  $t=0,1$  s

$$C_A.t = F.t + N_A.\sqrt{F.t}$$

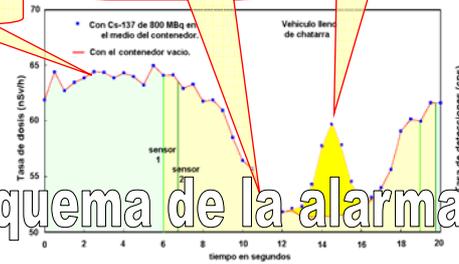
$N_A=12$  para  $t=1$  s

Diferentes alarmas

Fondo anterior

Fondo atenuado

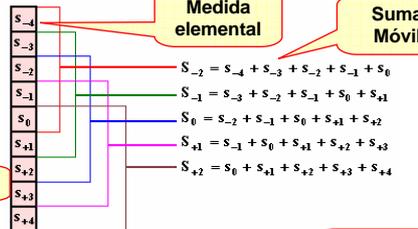
Alarma N1



Es importante el esquema de la alarma

#### 4.1.1- Efecto de la suma móvil para vehículos

- **Tiene limitaciones:**
- **En la zona del pico del Am-241:**
  - La suma móvil deforma el pico
- **Para altas velocidades es importante.**



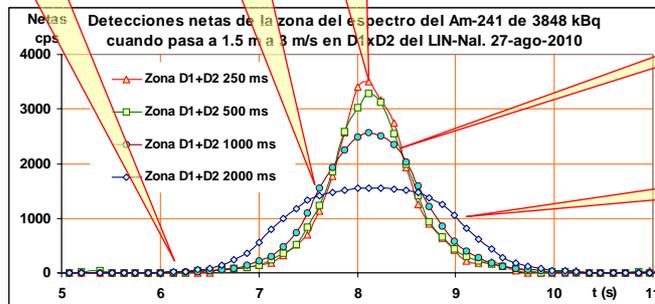
Medidas de 125 ms

Suma móvil de 0,25 a 2 s.

Pico

Se deforma

Cual es el mejor

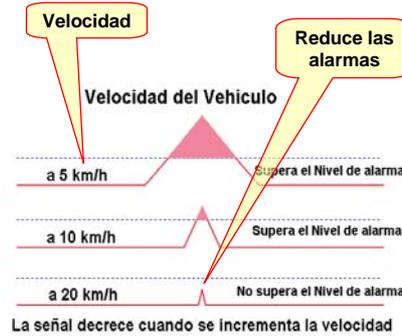
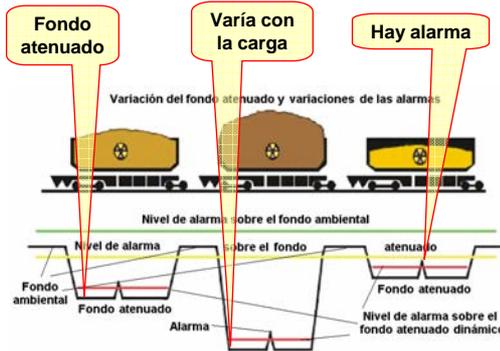


#### 4.1.2.- Relación de la alarma con la velocidad del vehículo.

- **La señal de una muestra puntual:**
  - Es una función con varias variables.
- **El fondo atenuado depende de la carga:**
  - Su distribución complica la respuesta.
- **La velocidad reduce la señal:**
  - No se ha de superar los 8 km/h.

$$C(x) - F_A = \frac{C_M - F_A}{R^2 + (v.t)^2}$$

Labels: Fondo atenuado, Forma del pico, Distancia al detector, Velocidad



#### 4.2.- Nuevos esquema de detección de muestras.

- **SPRT**
- **Relación de Probabilidades Secuenciales:**
  - Cada medida puede ser del fondo o de la muestra.
  - La relación entre sus probabilidades lo define.

$$\prod_1^i \frac{f_1(x_i)}{f_0(x_i)} > 10^h$$

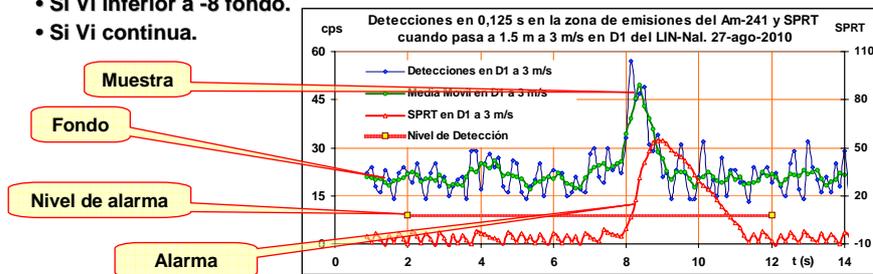
Labels: Muestra, Límite

- **Aplicación.**
  - Cada medida se multiplica por un factor. C1
  - Se suma una constante. C2
- **El resultado, Si, se suma al anterior, Si-1.**
  - Si Vi superior a 8 detección
  - Si Vi inferior a -8 fondo.
  - Si Vi continua.

$$V_i = V_{i-1} + C_1 X_i - C_2 \quad i = 2, 3, \dots \quad V_1 = 0$$

$$C_1 = \log(\mu_1 / \mu_0) \quad \text{y} \quad C_2 = [(\mu_1 - \mu_0) \log(e)]$$

Label: Fondo



#### 4.2.1- Otros esquemas de detección de muestras.

• Relación de Probabilidades Secuenciales:

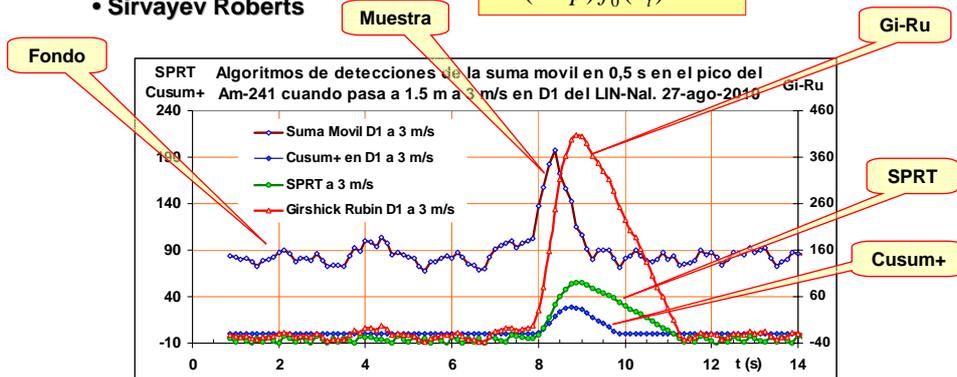
- Cusum +
- SPRT

$$\prod_1^i \frac{f_1(x_i)}{f_0(x_i)} > 10^h$$

• Estadística Bayesiana:

- Girshink Rubin
- Sirvayev Roberts

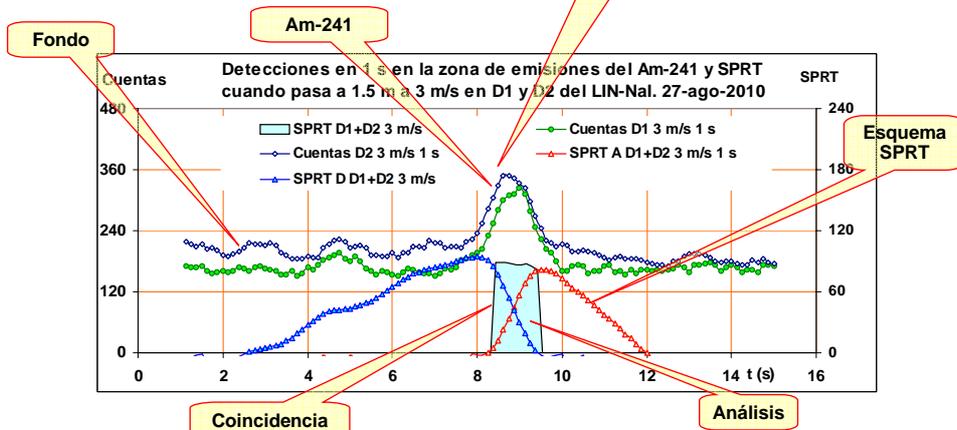
$$\prod \frac{f_1(x_i)}{(1-p)f_0(x_i)} > L$$



#### 4.2.2- Medida correlacionada con 2 detectores de NaI(Tl)

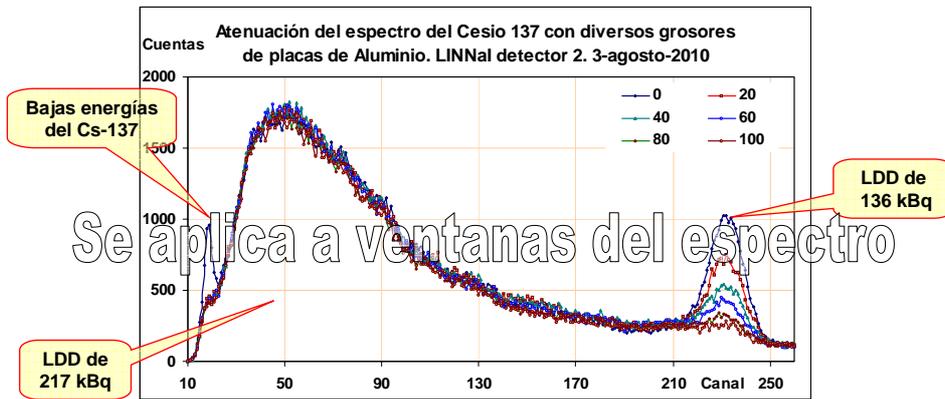
Equipo del Laboratorio

- 1 - Medidas en 125 ms en el Laboratorio.
- 2 - Suma móvil de 1 s.
- 3 - Dos detectores



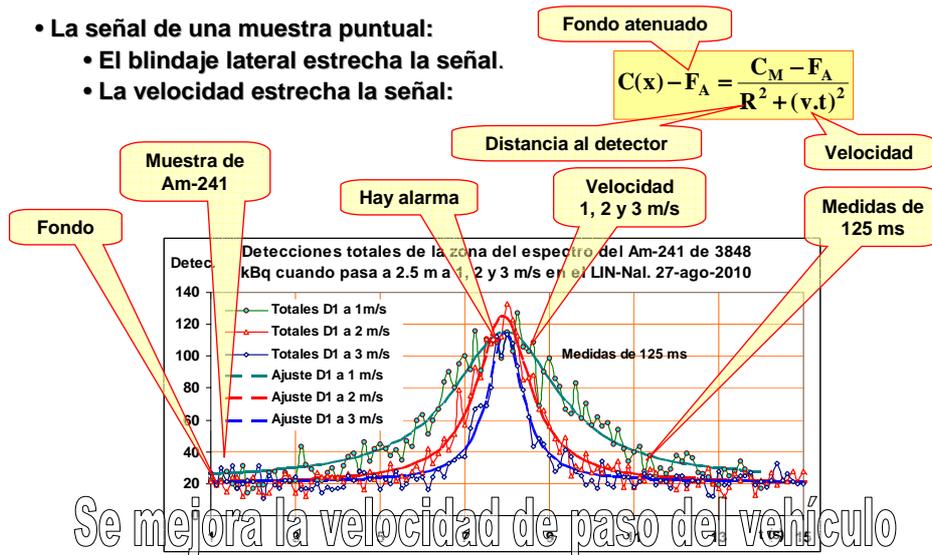
#### 4.3 - Ventanas de atenuación del detector de NaI(Tl)

- Un detector de NaI(Tl) de 2"x4"x16 para el Cs-137 a 2 m:
  - Es mejor el LDD en la zona del pico que en todo el espectro
  - Se identifica la muestra y se calcula la atenuación



#### 4.4- Efecto de la velocidad del vehículo.

- La señal de una muestra puntual:
  - El blindaje lateral estrecha la señal.
  - La velocidad estrecha la señal:



## 4.5.- Calibración estática y dinámica de los pórticos

**Medidas básicas**

- **Fondo de los detectores:  $r_0$** 
  - Tiene una distribución de Poisson.
- **Tasa neta de las detecciones:  $r_n$** 
  - Detecciones total menos fondo.
  - Tienen una distribución de Poisson
- **Eficiencia del detector:  $E_P, E_D$** 
  - Relación entre las detecciones netas  $y$ :
    - Las emisiones (no la actividad)
    - La tasa de dosis en la superficie.

**Incertidumbre típica de las medidas**

- **Incert. de las detecciones:  $u(r_n)$** 
  - Es función de las detecciones
  - Función del fondo
  - Función de los tiempos de las medidas.
- **Incert. de la eficiencia:  $u(E_P), u(E_D)$** 
  - Es función de la incert. de la actividad
  - Y de la incert. asociada al ensayo.

Según norma ISO-11929

$$y = r_g = \frac{n_g}{t_g}$$

$$y = \left( \frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) = r_n = r_g - r_0$$

$$y = E_P = \frac{r_g - r_0}{A_M} \quad y = E_D = \frac{r_g - r_0}{D_M}$$

$$\tilde{u}(y) = \sqrt{\frac{y + r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0}}$$

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{A_M^2} \left( \frac{y \cdot A_M + r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} \right) + y^2 \frac{u^2(A_M)}{A_M^2}}$$

### 4.5.1.- Proceso de calibración estática y dinámica de los pórticos.

- **Calibración estática con Cs-137:**
  - En el centro del pórtico.
  - En el centro del detector.
- **Calibración dinámica con Cs-137**
  - Trayectoria central o lateral.
  - Andando o en vehículo.

**Centro del pórtico**

**Centro del detector**

**Vehículo**

**Andando**

Muestra de Cs-137

220 cm

270 cm

218 cm

242 cm

Se amplia a 5 Isótopos y hasta 20 km/h

#### 4.5.2.- Cálculo de los parámetros límites y de alarma de los pórticos

**Parámetros Límites ISO-11929**

- **Nivel de decisión:  $y^*$** 
  - Con una probabilidad del 99,9 %.
- **Límite de detección:  $y^\#$** 
  - Con una probabilidad del 99,9 %.
- **Los cálculos se aplican a:**
  - Detecciones netas:  $r_n$
  - Actividad y tasa de dosis:  $A_M, D_M$

$$y^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0)$$

$$y^\# = y^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(y^*)$$

**Parámetros fijados en el pórtico**

- **Nivel de alarma:  $r_n^A, A_M^A$** 
  - Fijado en los parámetros del pórtico.
  - Se calcula para la actividad y tasa de dosis

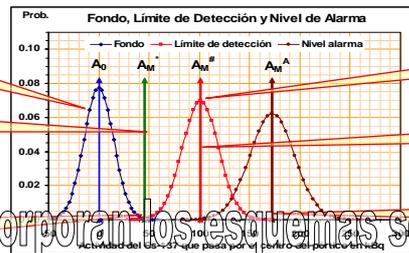
$$r_n^A = N_A \sqrt{r_0}$$

$$A_M^A = r_n^A / E_P$$

**Muestra sin actividad**

**Nivel de decisión**

**Falsas alarmas 0,1 %**



**Límite de detección**

**Detectada al 99,9 %**

**Nivel de alarma**

#### 5.- Conclusiones obtenidas en la calibración de los pórticos

**Parámetros de los pórticos**

- **Fondo de los detectores**
  - Depende del entorno y del ambiente.
- **Eficiencia estática y dinámica.**
  - En el centro del pórtico. (andando)
- **Nivel de alarma en kBq y en cps/nSv/h.**
  - Con la eficiencia dinámica:
- **Nivel de decisión y límite de detección.**
  - Probabilidades del 99,9 %
  - Fondo en 10 s y muestra en 1 s.

**El fondo, la eficiencia y el nivel de alarma se miden**

**El nivel de decisión y el límite de detección se calculan**

**Lo fija la regulación**

**Condiciones de los pórticos**

- **Valor guía de la detección dinámica.**
  - Inferior a 600 kBq o 10 nSv/h para el Cs-137
- **El nivel de alarma ha de ser:**
  - Inferior al valor guía.
  - Superior al límite de detección.

**Valores guía para fronteras**

**Verificar cada año con medidas**

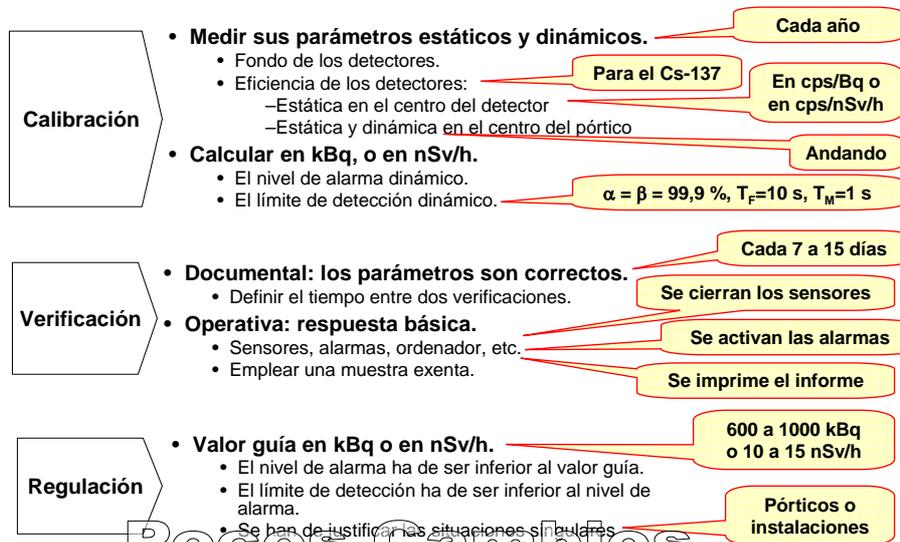
**Resultados en 13 pórticos**

- **El límite de detección varía de 100 a 350 kBq.**
  - Un pórtico tiene un valor superior a 600 kBq.
- **El nivel de alarma varía de 150 a 260 kBq.**
  - Tres pórticos deben incrementar el nivel de alarma

**Un pórtico no cumple**

Pocos Cambios

## 5.1.- Recomendaciones para aplicar a los pórticos



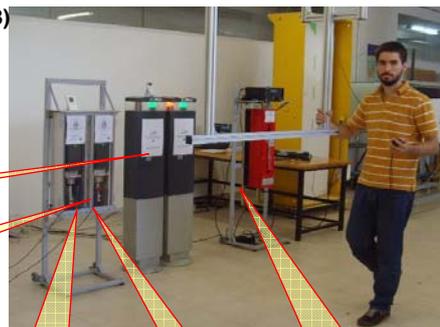
## 5.2.- Pórticos y pedestales para personas con espectrometría.

- **Pedestales en Aeropuertos. (ANSI-N42.38)**
  - 1 a 2 Detectores de NaI de 2"x4"x16.
- **Pórticos en Puertos.**
  - 16 Detectores de NaI de 2"x4"x16.
  - Para la segunda línea.
  - También realiza medidas estáticas.



Mejor 2 de NaI(Tl)

4 NaI(Tl) de 40x16x16 cm



Mejorar los esquemas de detección

No tiene alarmas inocentes

Diseño modular

Proyecto del Laboratorio

## Agradecimientos

---

Muchas gracias.

Este trabajos se ha realizado gracias a los convenios establecidos con:

**enresa**

**CSN** 



y la colaboración de los técnicos:

Juan A. González  
Maria J. Suárez  
Luis Pujol

# **Efectos colaterales en radioterapia. Riesgo neutrónico**

**Francisco Sánchez Doblado**

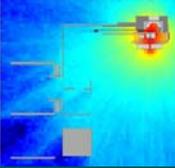
*Catedrático de Física Médica. Universidad de Sevilla*

**Visualización Diapositivas**

### Efectos colaterales en Radioterapia: Riesgo neutrónico

F. Sánchez-Doblado<sup>1,2</sup>, C. Domingo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hospital Universitario Virgen Macarena, <sup>2</sup>Universidad Sevilla, <sup>3</sup>Univ. Autónoma Barcelona

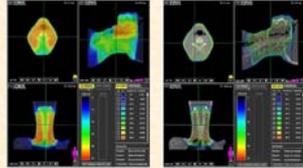

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

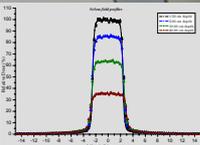
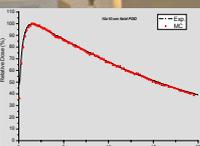
UNB

Madrid, 3-March-2011

### Treatment Planning System



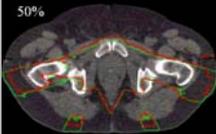
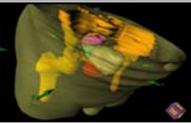
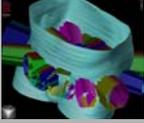



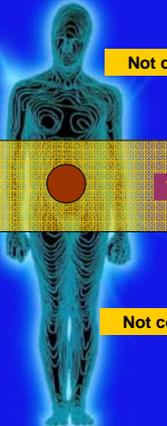








INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2008

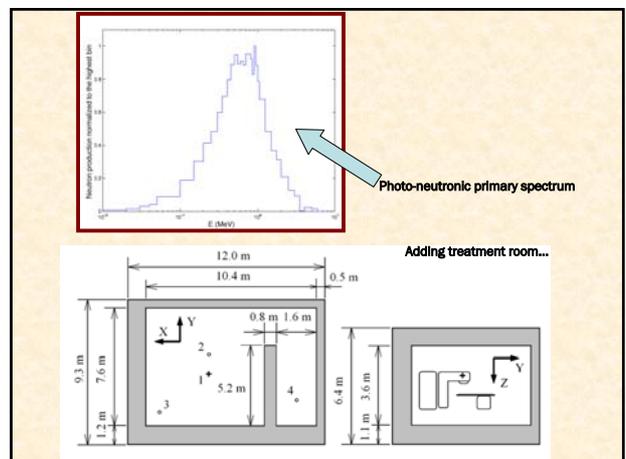
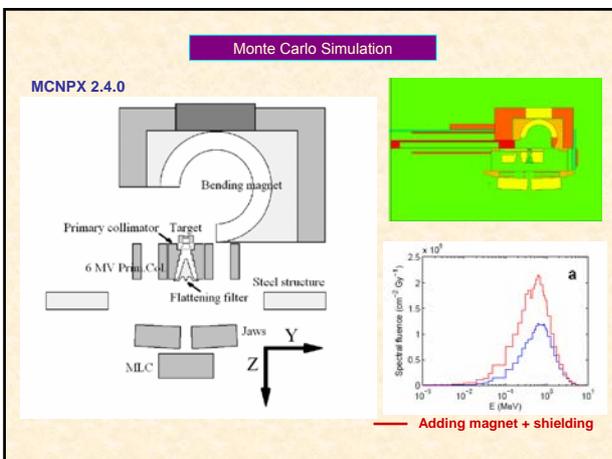
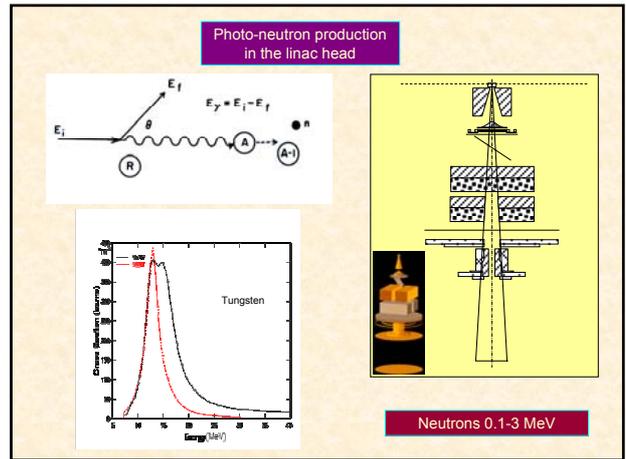
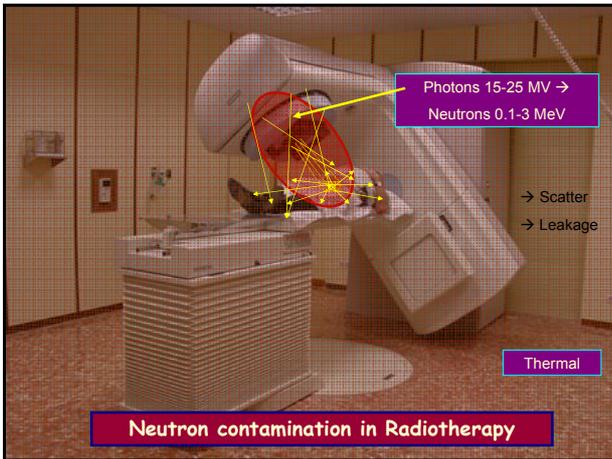
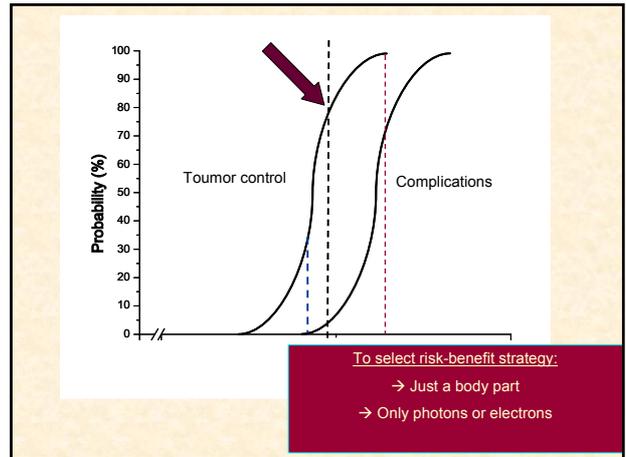
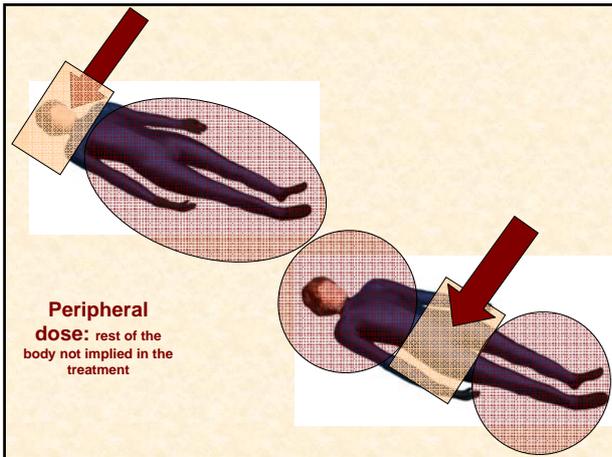







Not considered

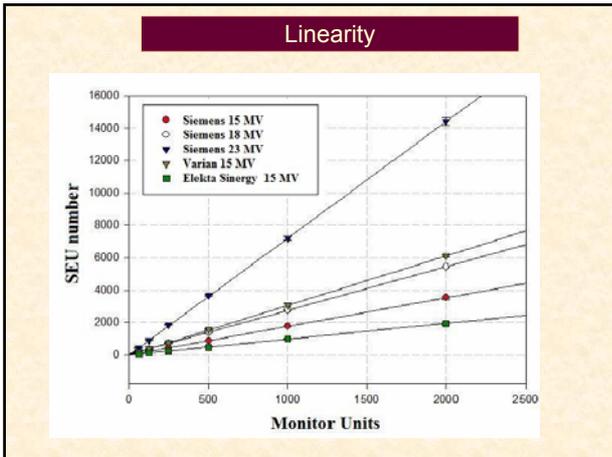
Very high precision

Not considered









### GKSS

- Thermal neutron beam (average energy ~ 40 meV)  
"Reactor FRG-1 Geesthacht Neutron Facility"



IOP PUBLISHING  
PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY  
Phys. Med. Biol. 55 (2010) 1025–1039  
doi:10.1088/0031-9155/55/4/1025

### A new active method for the measurement of slow-neutron fluence in modern radiotherapy treatment rooms

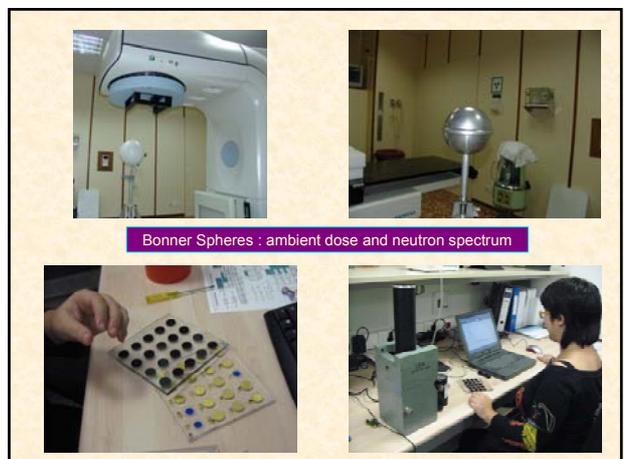
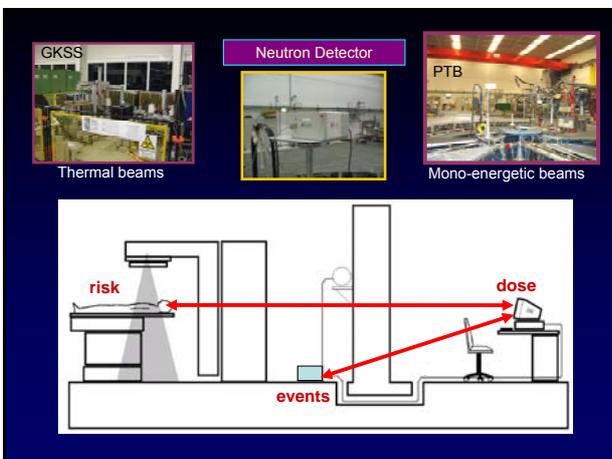
F Gómez<sup>1</sup>, A Iglesias<sup>1</sup> and F Sánchez Doblado<sup>2</sup>

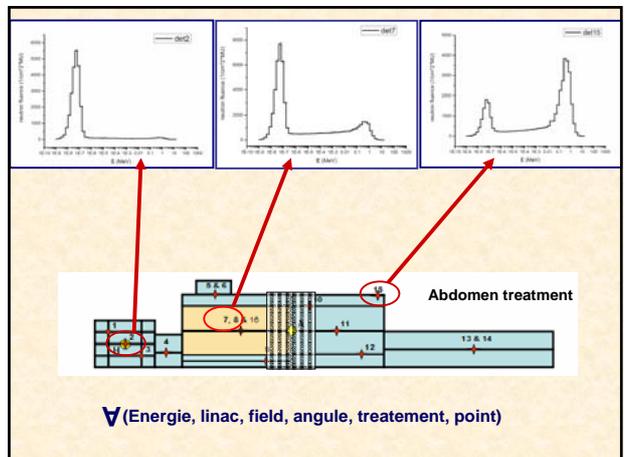
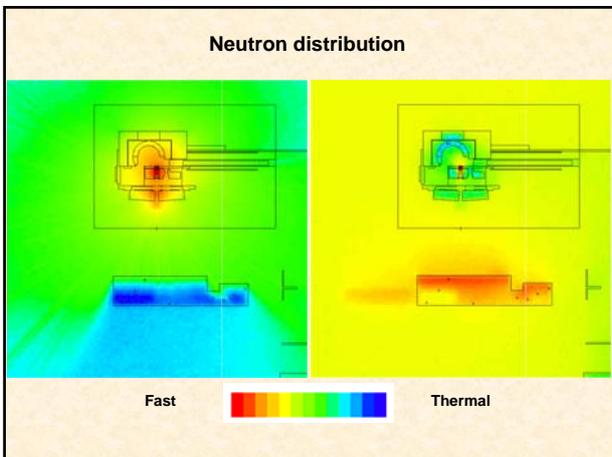
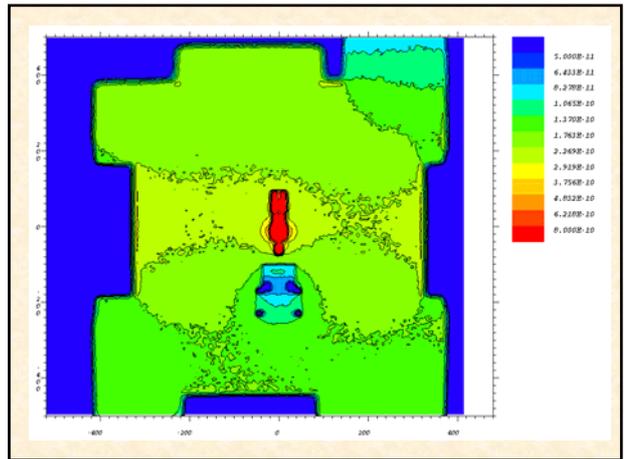
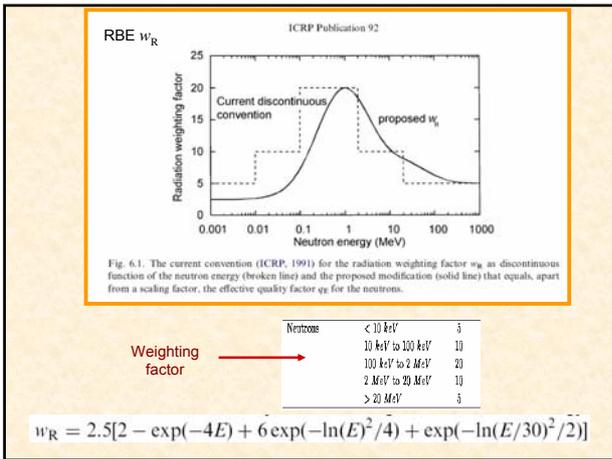
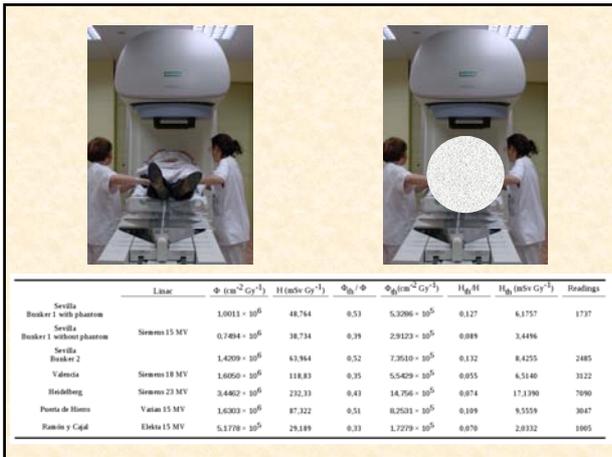
<sup>1</sup> Departamento de Física de Partículas, Universidad de Santiago, 15782-Santiago, Spain  
<sup>2</sup> Hospital Universitario Virgen Macarena, Radiofísica and Departamento de Fisiología Médica y Biofísica, Facultad de Medicina, Universidad de Sevilla, Spain

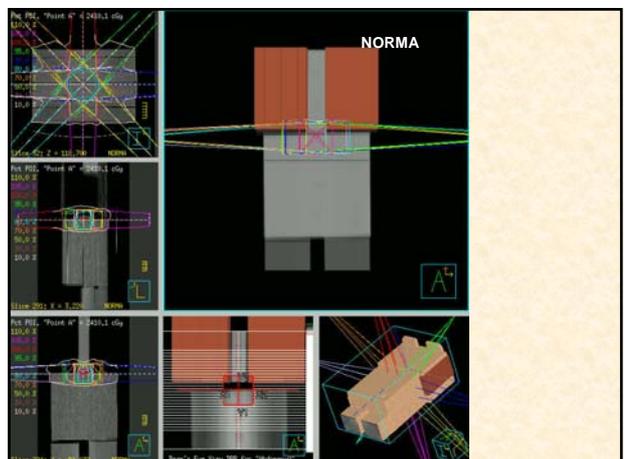
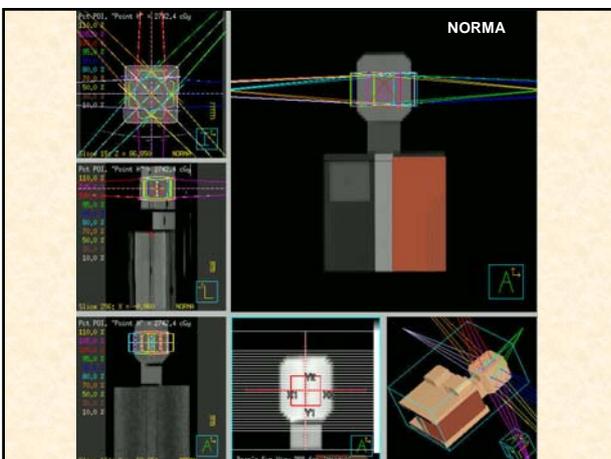
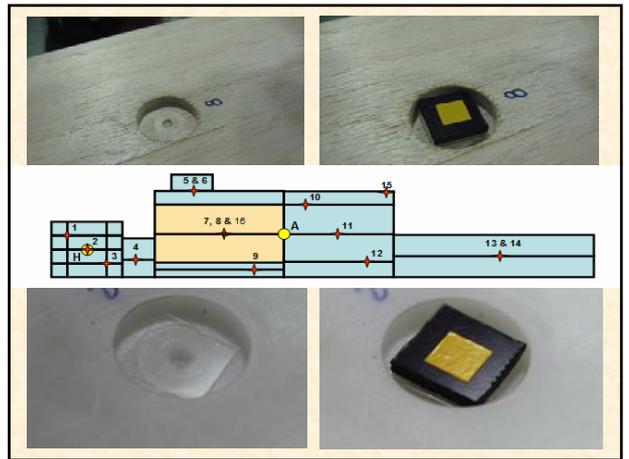
E-mail: [fastino.gomez@usc.es](mailto:fastino.gomez@usc.es)

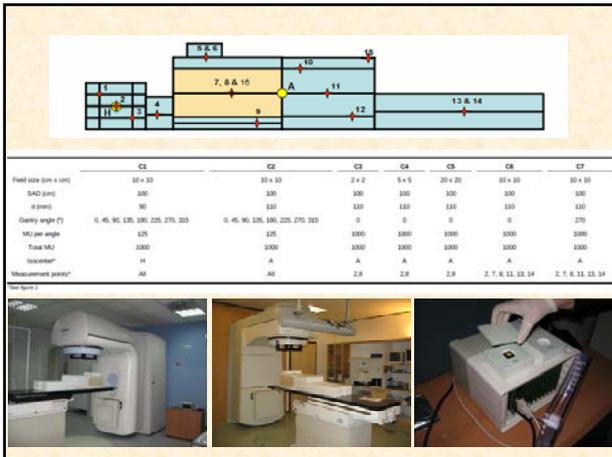
Received 16 August 2009, in final form 20 December 2009  
 Published 20 January 2010  
 Online at [stacks.iop.org/PMB/55/1025](http://stacks.iop.org/PMB/55/1025)

**Abstract**  
 This work focuses on neutron monitoring at clinical linac facilities during high-energy modality radiotherapy treatments. Active in-room measurement of neutron fluence is a complex problem due to the pulsed nature of the fluence and the presence of high photon background, and only passive methods have



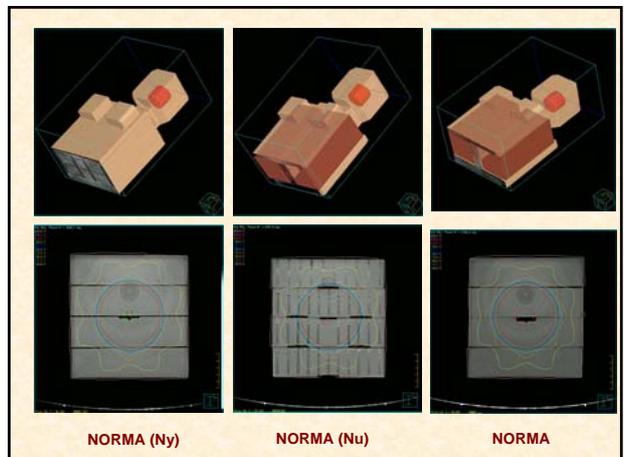
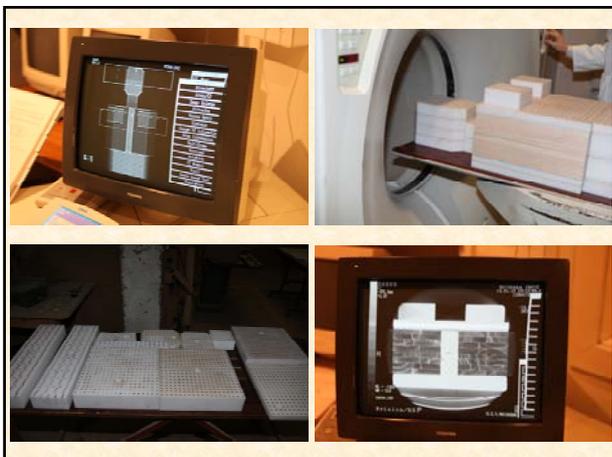
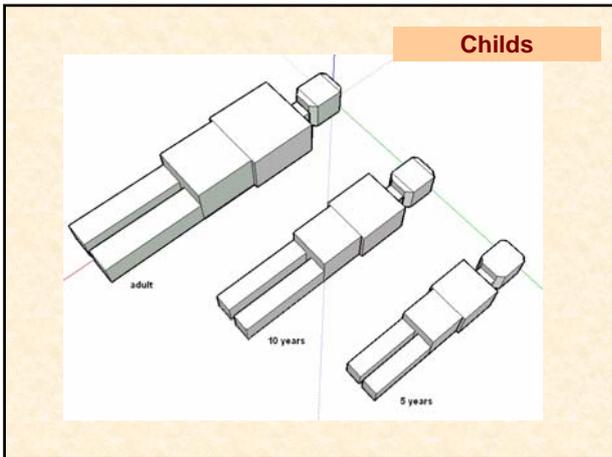


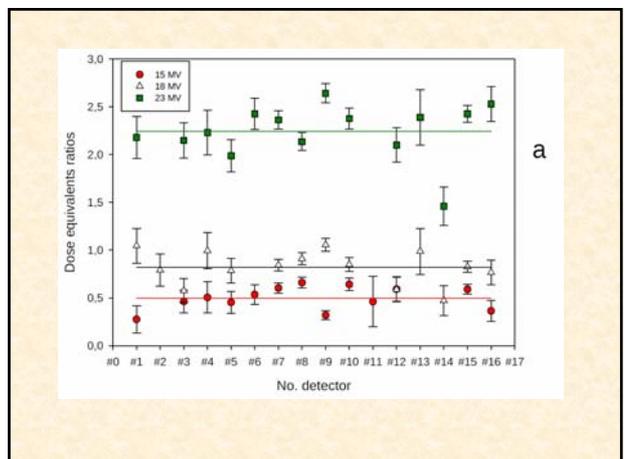


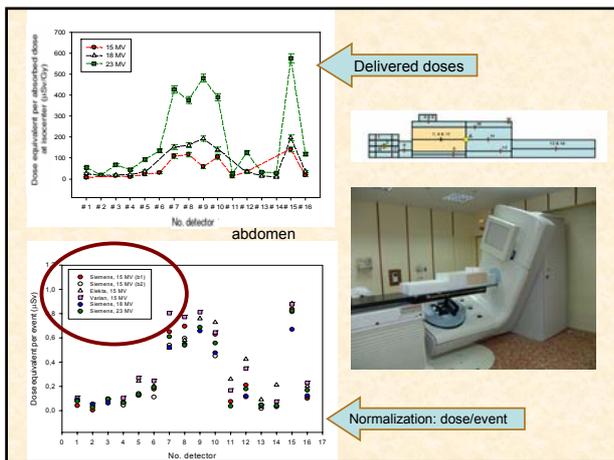
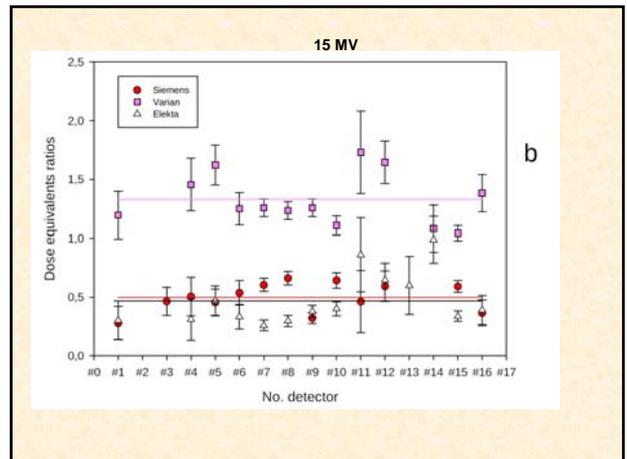
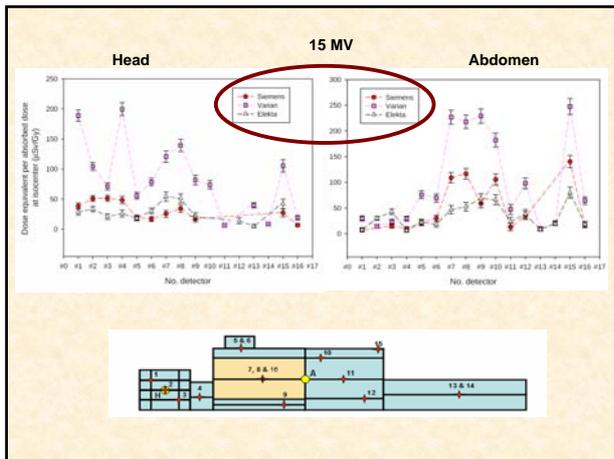


Facility	Linac	Nominal Energy (MV)	TPR20/10	Bunker volumen (m³)*
Hospital Universitario Ramón y Cajal (HURC)	Elekta Synergy	15	0,756	6,87x6,08x3,00
Hospital Universitario Puerta de Hierro, Majadahonda (HUPH)	Varian Clinac	15	0,7603	7,00x8,35x3,51
Hospital Universitario Virgen Macarena (HUVM)	Siemens Primus	15	0,74	7,57x8,95x4,68 (B1) 4,10x8,45x4,68 (B2)
Hospital General Valencia (ERESA)	Siemens Primus	18	0,775	6,50x6,50x3,55
Universitätsklinikum, Heidelberg (UKH)	Siemens Mevatron	23	0,788	6,55x8,33x3,10

\* volumen transversal x longitudinal x height





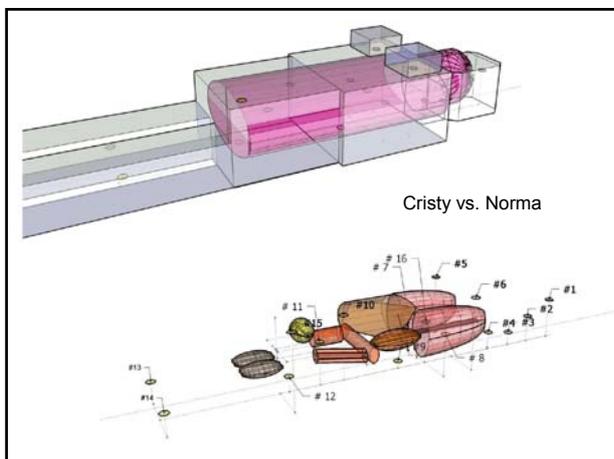


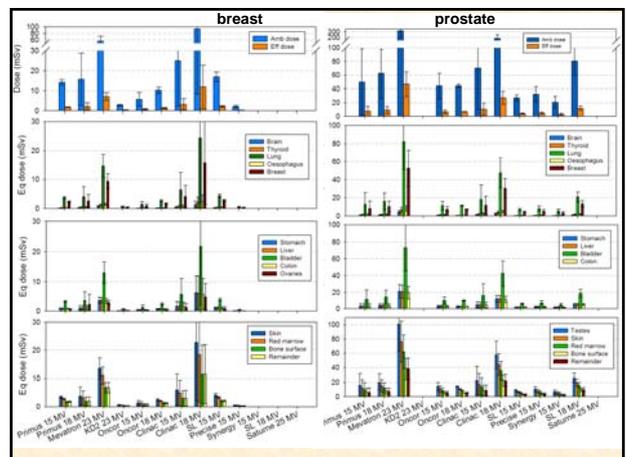
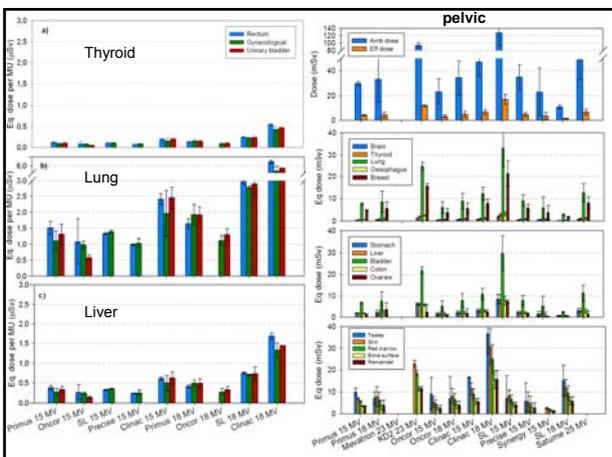
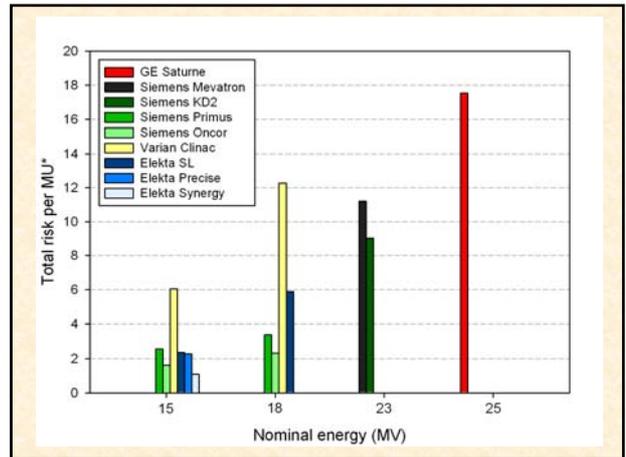
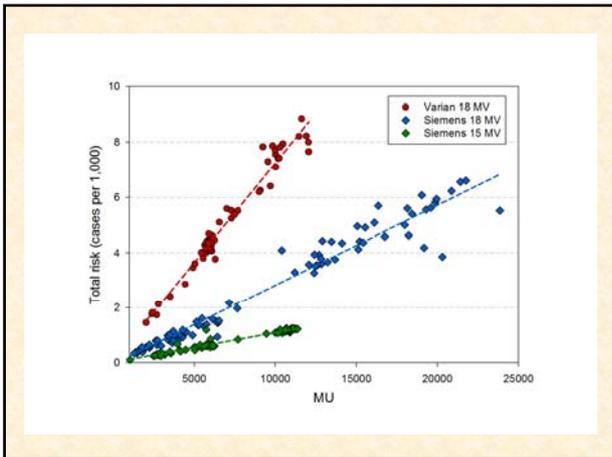
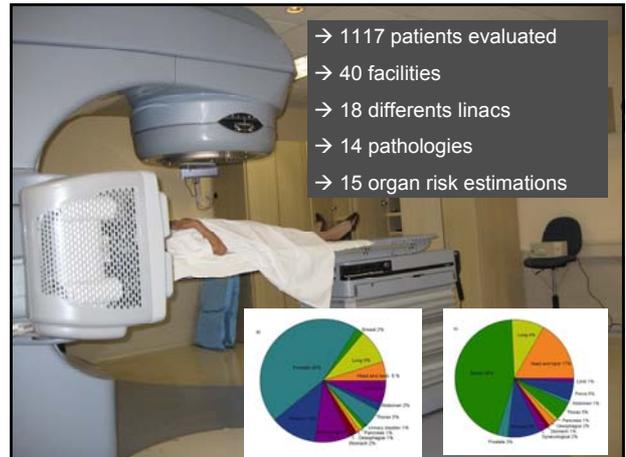
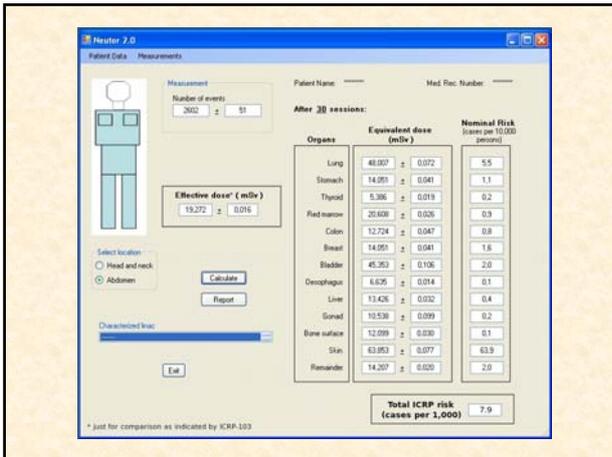
**From event to risk**

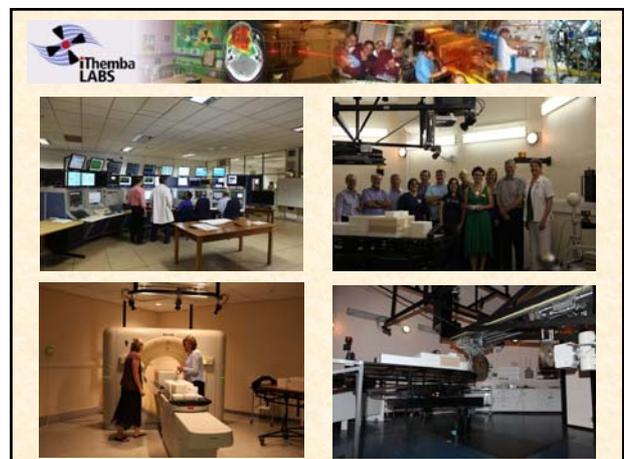
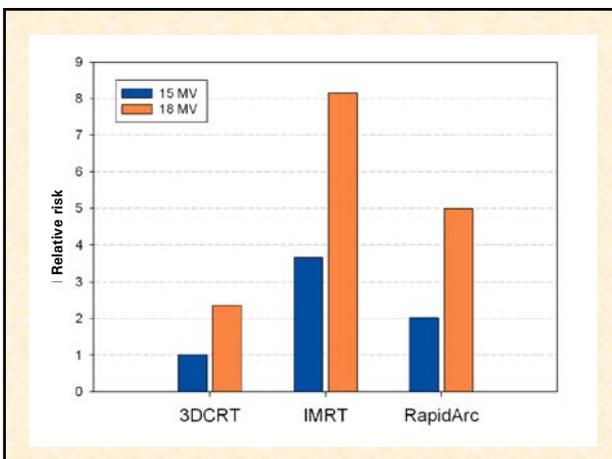
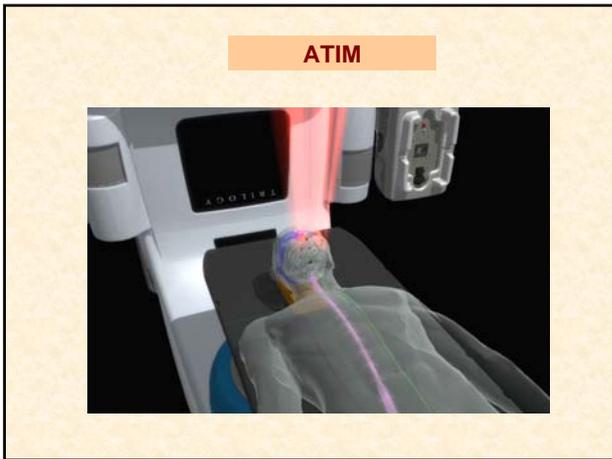
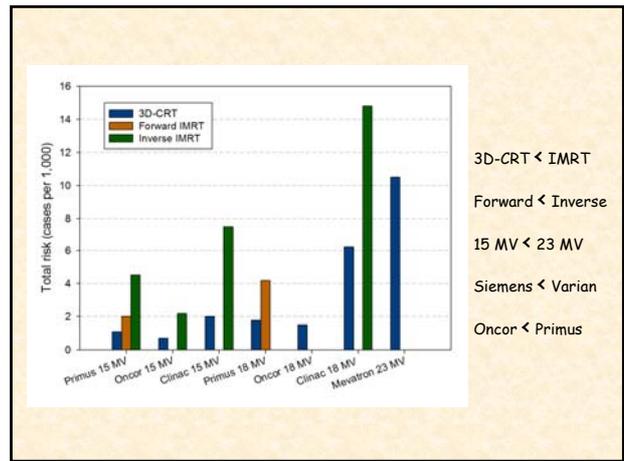
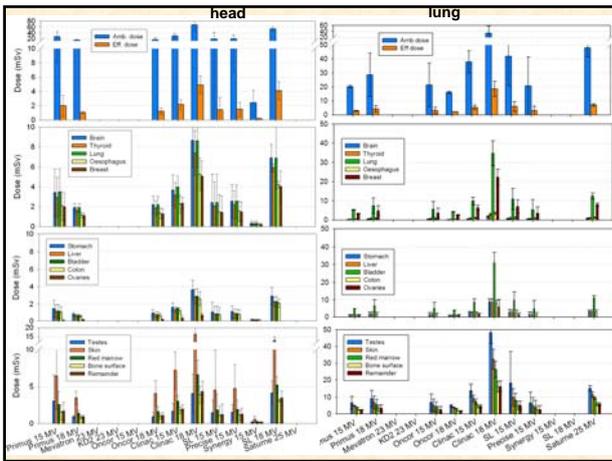
ICRP-103

Normal Risk Coefficient (cases per 10,000 persons per Sv)

Organ	Siemens	Varian	Abdomen treatment
Lung	0.33 ± 0.13	0.615 ± 0.072	
Stomach	0.173 ± 0.051	0.18 ± 0.041	
Thyroid	0.281 ± 0.018	0.069 ± 0.019	
Rest marrow	0.268 ± 0.061	0.264 ± 0.026	
Colon	0.084 ± 0.018	0.163 ± 0.047	
Breast	0.173 ± 0.051	0.18 ± 0.041	
Bladder	0.153 ± 0.062	0.58 ± 0.11	
Oesophagus	0.251 ± 0.031	0.085 ± 0.014	
Liver	0.138 ± 0.04	0.172 ± 0.032	
Ovary	0.0198 ± 0.008	0.135 ± 0.009	
Testis	0.207 ± 0.077	0.49 ± 0.071	
Bone surface	0.123 ± 0.03	0.185 ± 0.03	
Skin	0.28 ± 0.13	0.818 ± 0.077	
Remainder	0.142 ± 0.019	0.182 ± 0.02	
Effective dose	male 0.193 ± 0.021	0.291 ± 0.015	
	female 0.178 ± 0.02	0.247 ± 0.016	







**BIOPLAN: SOFTWARE FOR THE BIOLOGICAL EVALUATION OF RADIOTHERAPY TREATMENT PLANS**  
 B. SANCHEZ-NIETO and A. E. NAHUM  
 Joint Department of Physics, Royal Marsden NHS Trust and the Institute of Cancer Research, Sutton, Surrey, UK

**Poisson model**

$$TCP = \sum_{k=0}^{\infty} g_k(\sigma_n) \cdot TCP(\alpha, \beta) \quad (1)$$

$$TCP(\alpha, \beta) = \prod_j TCP(\alpha_j, \beta_j, D_j, v_j) \quad (2)$$

$$= \prod_j \exp\left[-\beta_j \cdot v_j \cdot \exp\left(-\alpha_j \cdot D_j \cdot \left(1 + \frac{d_j}{\alpha_j \beta_j}\right) + \gamma \cdot (T - T_d)\right)\right] \cdot g_k(\sigma_n) \cdot \exp\left[\frac{-(\alpha_j - \beta_j)^2}{2 \cdot \sigma_n^2}\right] \quad (3)$$

**Lyman-Kutcher-Buman model**

$$NTCP = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^t \exp(-x^2/2) dx \quad (4)$$

$$t = \frac{D - TD_{50}(v)}{m \cdot TD_{50}(v)} \quad (5)$$

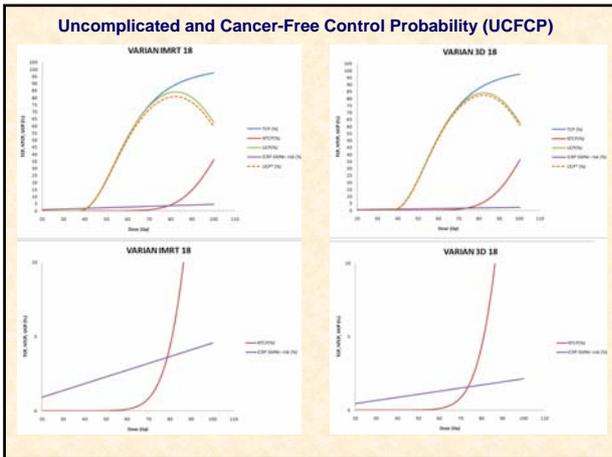
$$TD_{50}(v) = TD_{50}(1) \cdot v^{-n} \quad (6)$$

Prostate parameters →  $a = 0.29 \text{ Gy}^{-1}$   
 $\sigma_n = 5.07 \text{ Gy}^{-1}$   
 $\alpha/\beta = 10 \text{ Gy}$   
 $\rho_c = 10^7 \text{ cells/cm}^3$

$TD_{50} = 78 \text{ Gy}$   
 $m = 0.14$   
 $n = 0.05$

Uncomplicated and Cancer-Free Control Probability (UCFCP): a new integral approach to the treatment plan optimization in photon radiation therapy

$$UCFCP = TCP \cdot \prod_{i=1}^n (1 - NTCP_i) \cdot (1 - \lambda_n \cdot SMNR_n) \cdot (1 - \lambda_p \cdot SMNR_p)$$



## Conclusions

- Low risk of neutrons, but a very big affected population → thousands of second cancers / year
- Evaluation very complex so far
- New online digital detector
- Good relationship with the organ and effective dose
- 1117 patients, 40 linacs, 16 pathologies.
- **At last we know what happens!**  
Any situation could be estimated
- **Current tasks:** radiobiological models, epidemiological studies, exotic linacs, hadrontherapie, TPS, more patients to evaluate...

