



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

# El futuro de la energía nuclear

Dra. Yolanda Moratilla Soria

Académica de Número de la Real Academia de Doctores de España

Presidenta del Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España

Investigadora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas en Comillas-ICAI

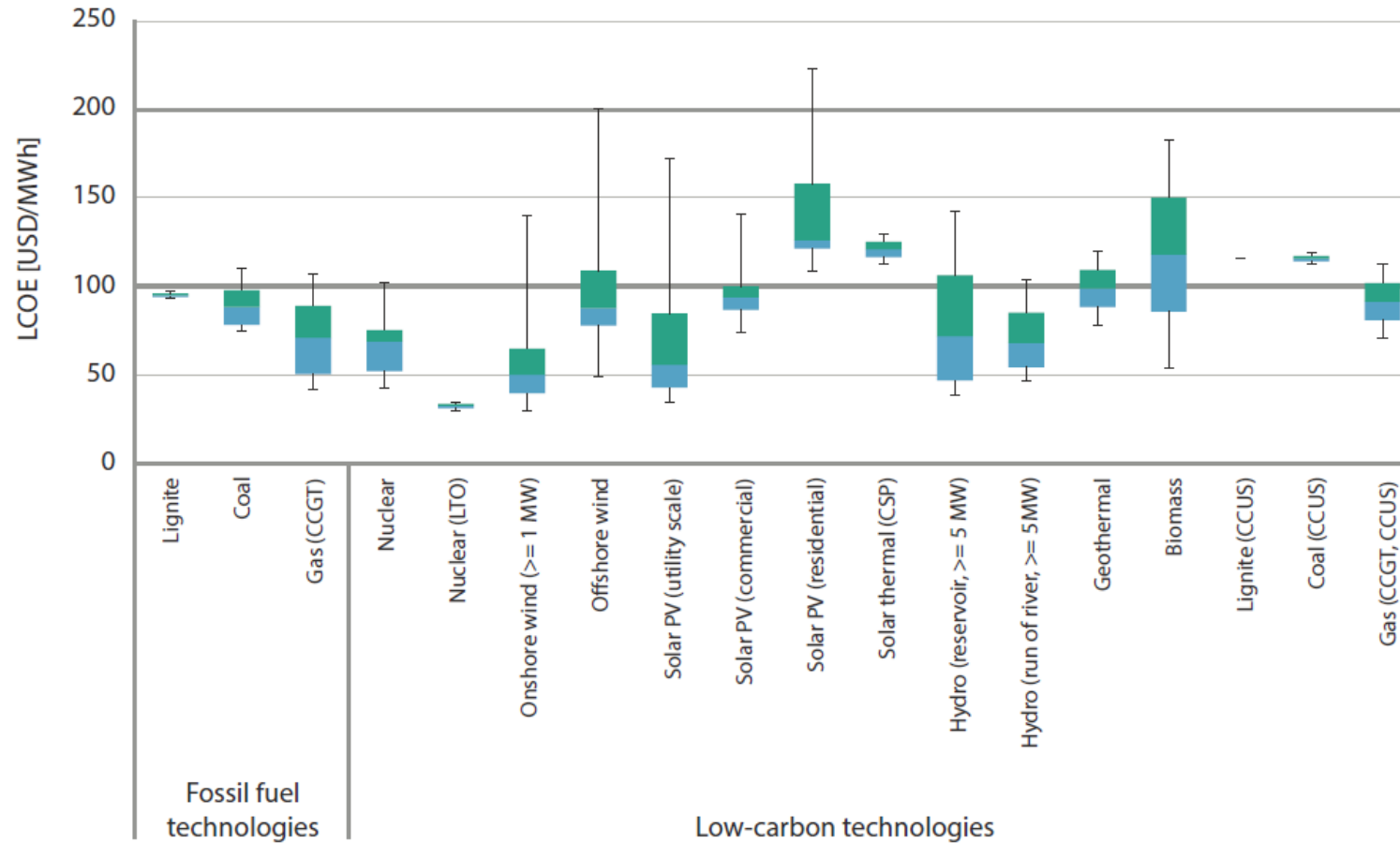
Profesora de Ingeniería Energética en Comillas-ICAI

**comillas.edu**

Enero de 2024

# Costes de generación (LCOE)

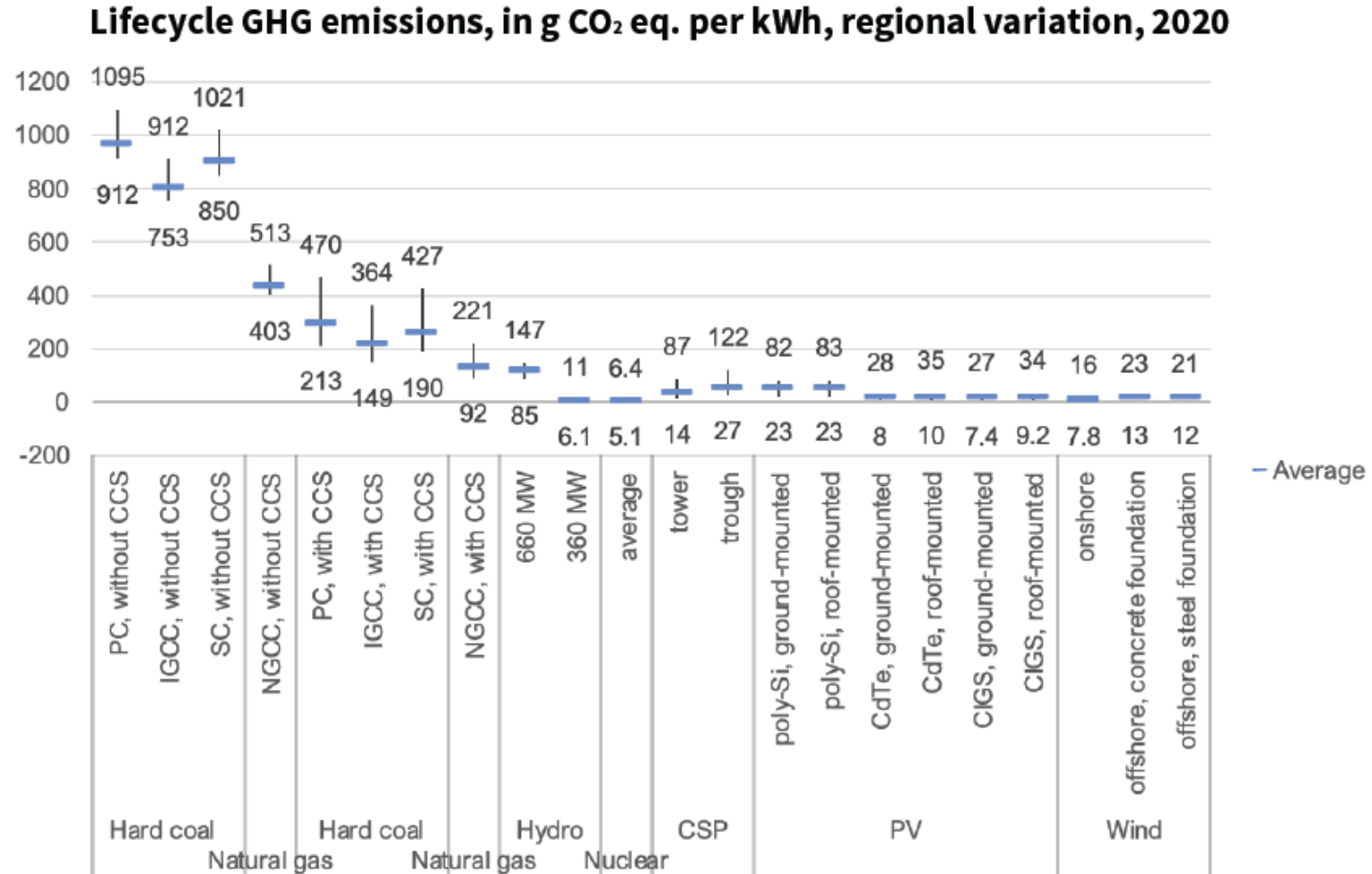
Figure ES1: LCOE by technology



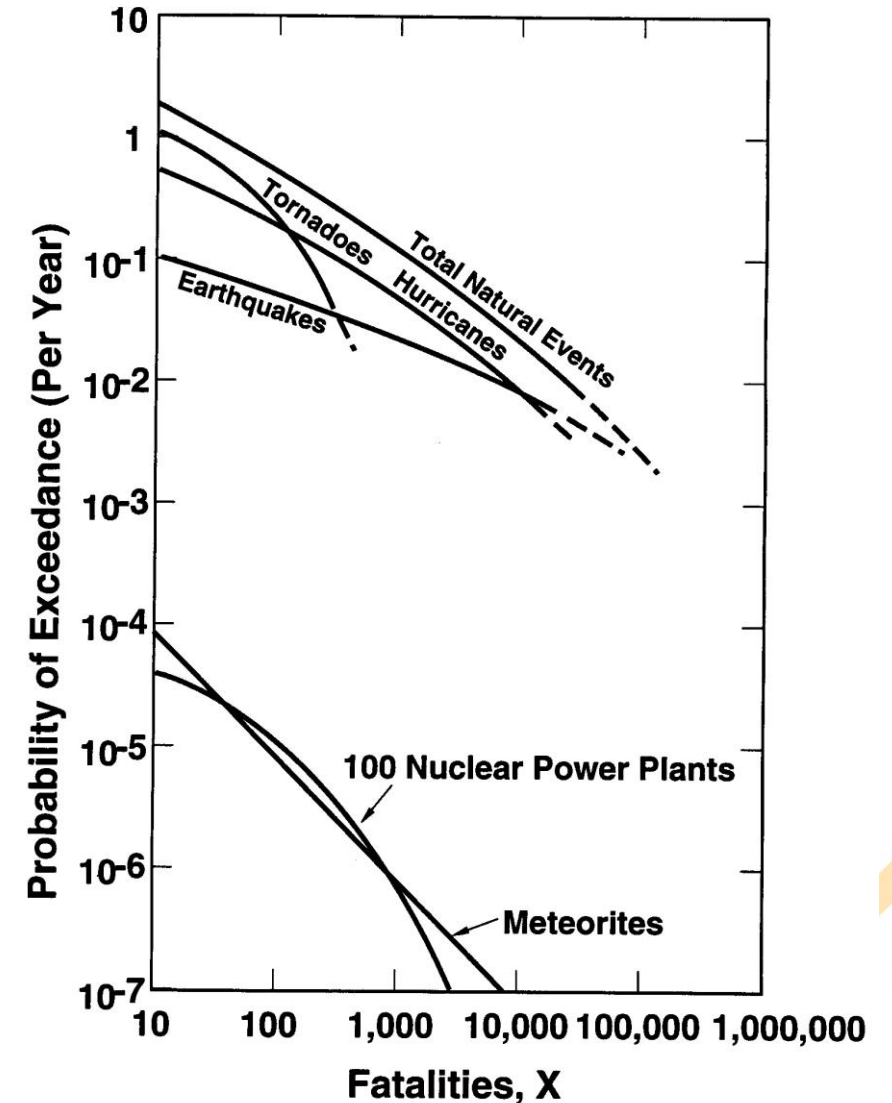
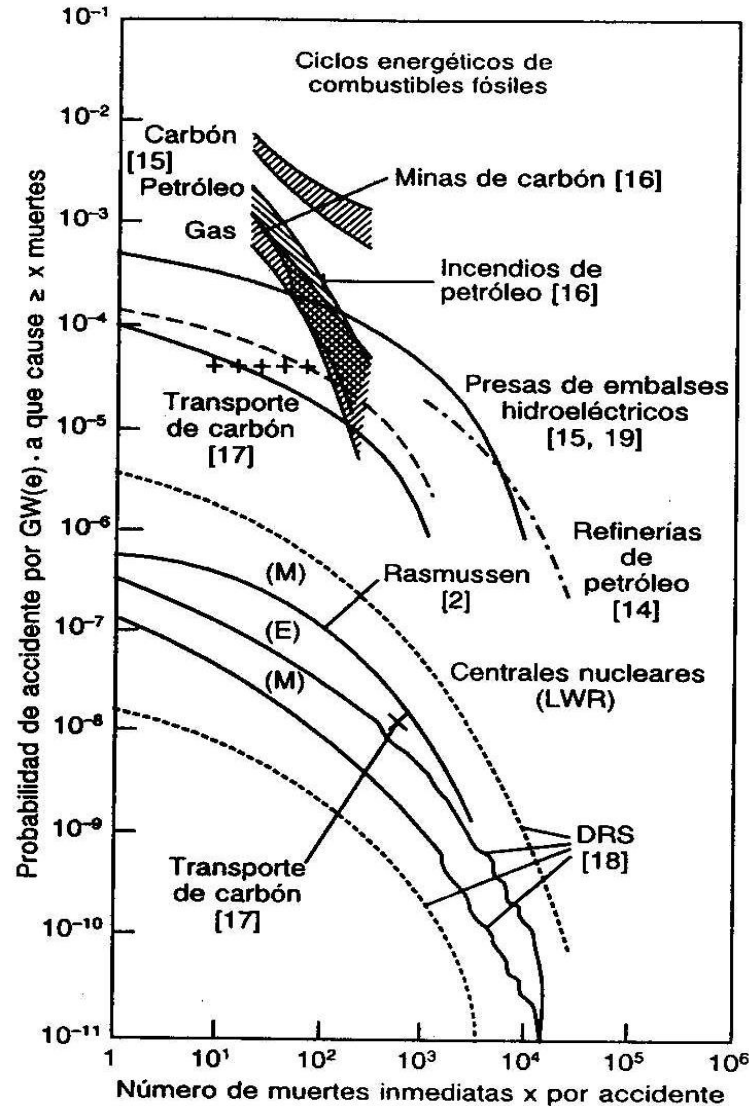
Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

# Emisiones de CO<sub>2</sub> (ciclo de vida)

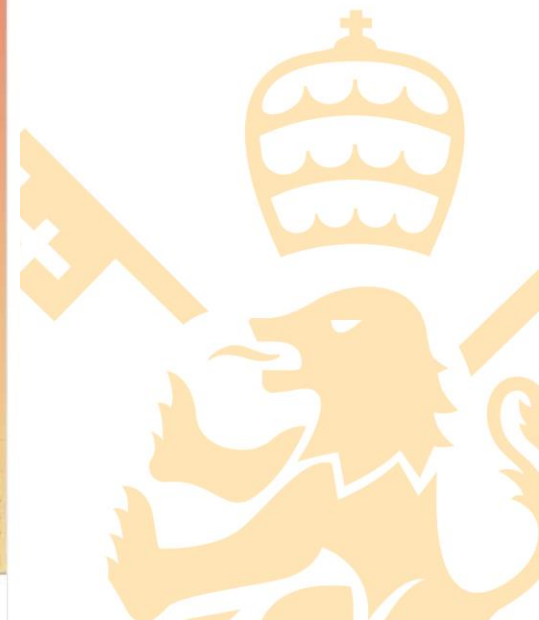
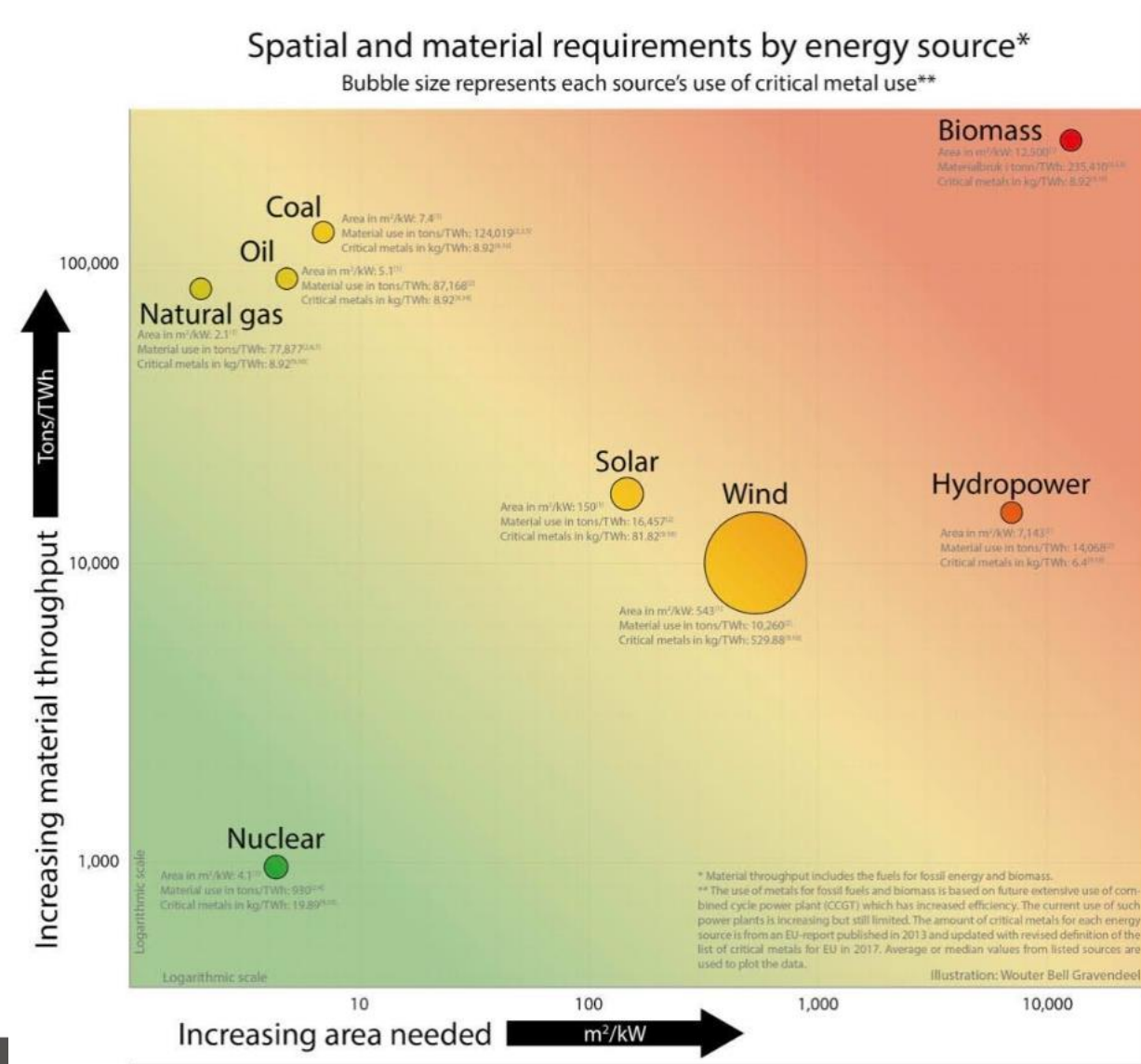
Figure 1 Lifecycle greenhouse gas emission ranges for the assessed technologies



# Seguridad comparada



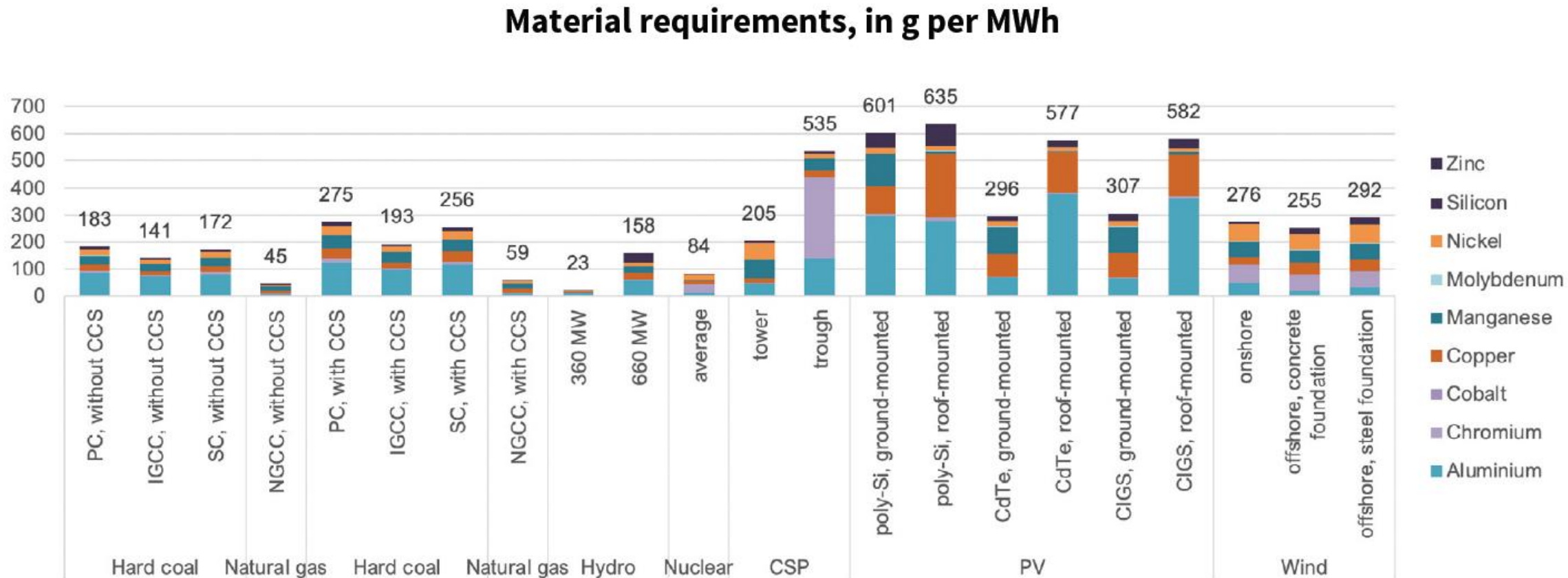
# Necesidades de superficie y materiales





# Uso de materias primas (ciclo de vida)

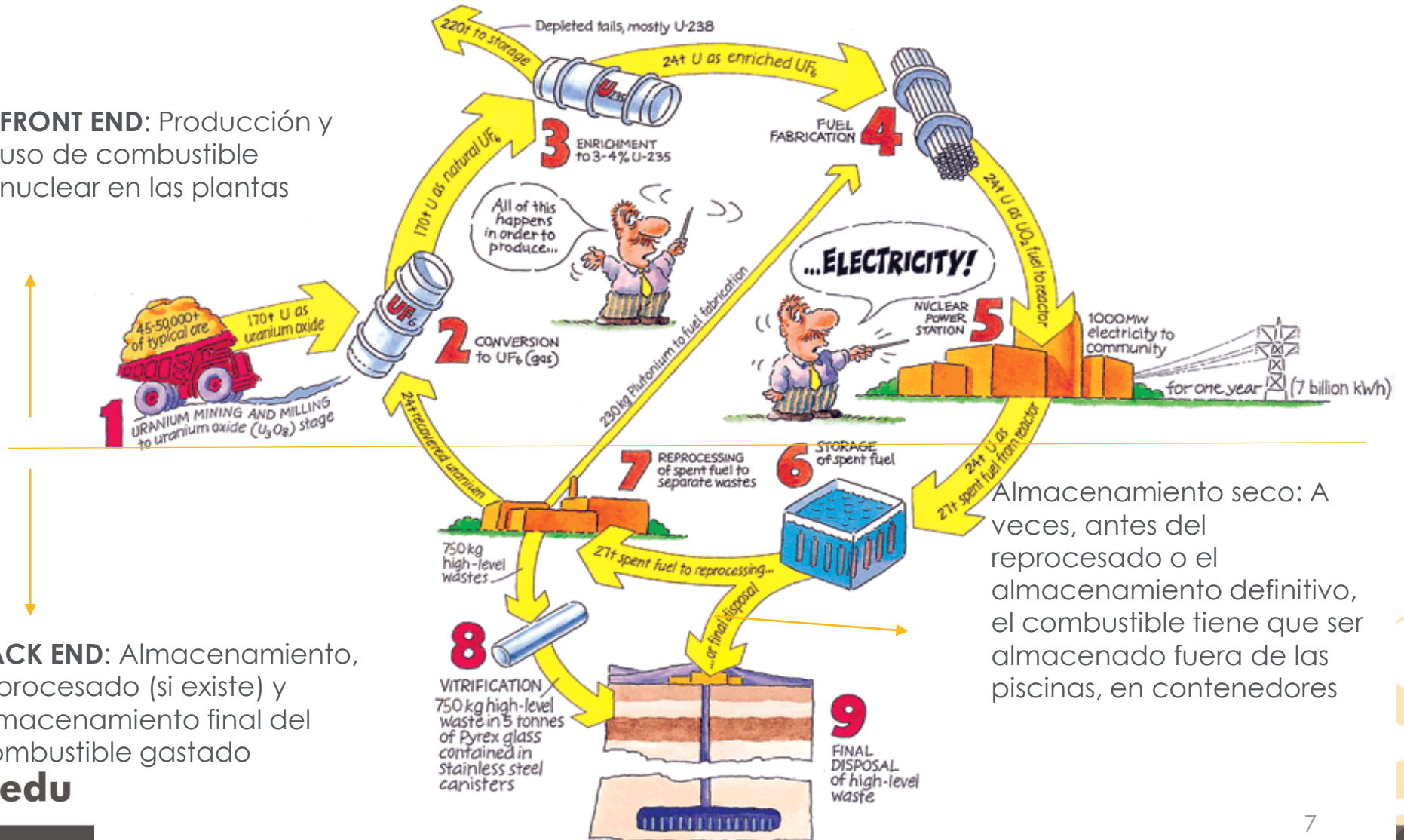
**Figure 46** Lifecycle requirements of select materials for electricity technologies, in g per MWh.



## CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

- Conjunto de operaciones necesarias para la fabricación del combustible destinado a las CC.NN., y para el tratamiento del combustible gastado.

**FRONT END:** Producción y uso de combustible nuclear en las plantas



**BACK END:** Almacenamiento, reprocesado (si existe) y almacenamiento final del combustible gastado

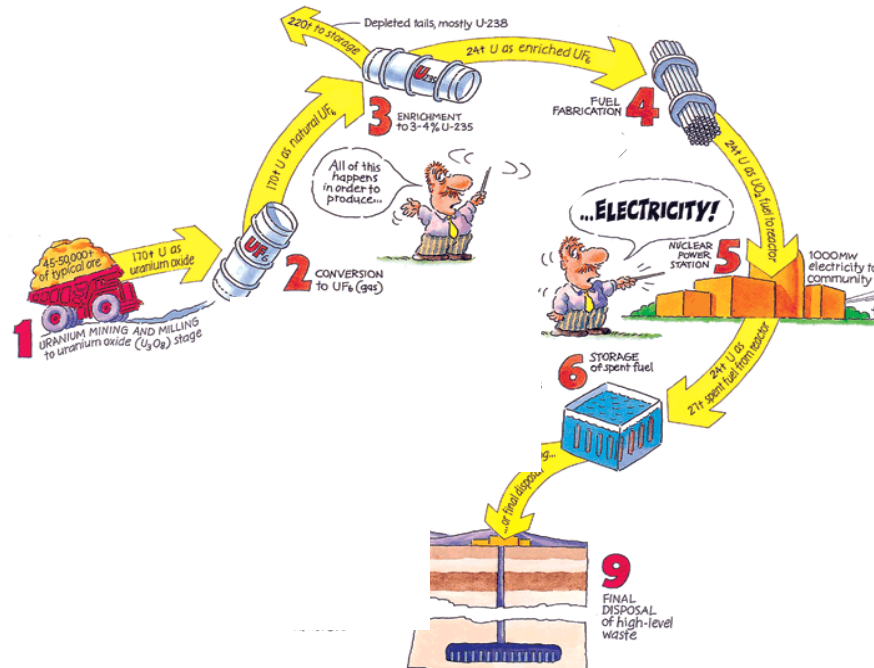
Almacenamiento seco: A veces, antes del reprocesado o el almacenamiento definitivo, el combustible tiene que ser almacenado fuera de las piscinas, en contenedores

## CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

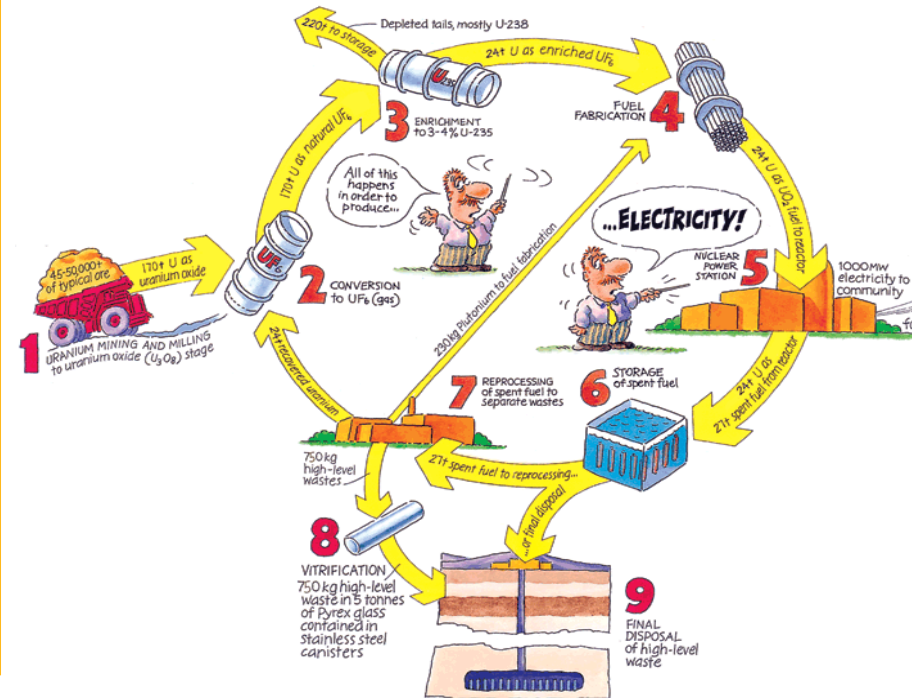
### Ciclo abierto y cerrado

- **Ciclo cerrado:** Tras la irradiación en el reactor, los elementos combustibles son reprocesados para recuperar el U-235 y Pu-239, y separarlos de los residuos de alta actividad.
- **Ciclo abierto:** El combustible usado no se reprocessa, sino que es tratado como residuo de alta actividad y llevado al almacenamiento definitivo.

#### OPEN CYCLE



#### CLOSED CYCLE





## CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

### Almacenamiento del combustible usado

La producción de combustible gastado tras años de operación de los reactores está provocando problemas de almacenamiento temporal y definitivo.

Tras una primera etapa de almacenamiento en las piscinas (para la refrigeración), el almacenamiento en seco (en cada reactor, ATI, o centralizado, ATC) y el transporte provocan desafíos técnicos y logísticos para la operación de las plantas.

**WET STORAGE AT REACTORS**



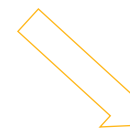
**TRANSPORTATION**



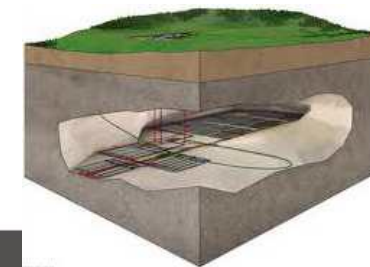
**CENTRALIZED STORAGE**



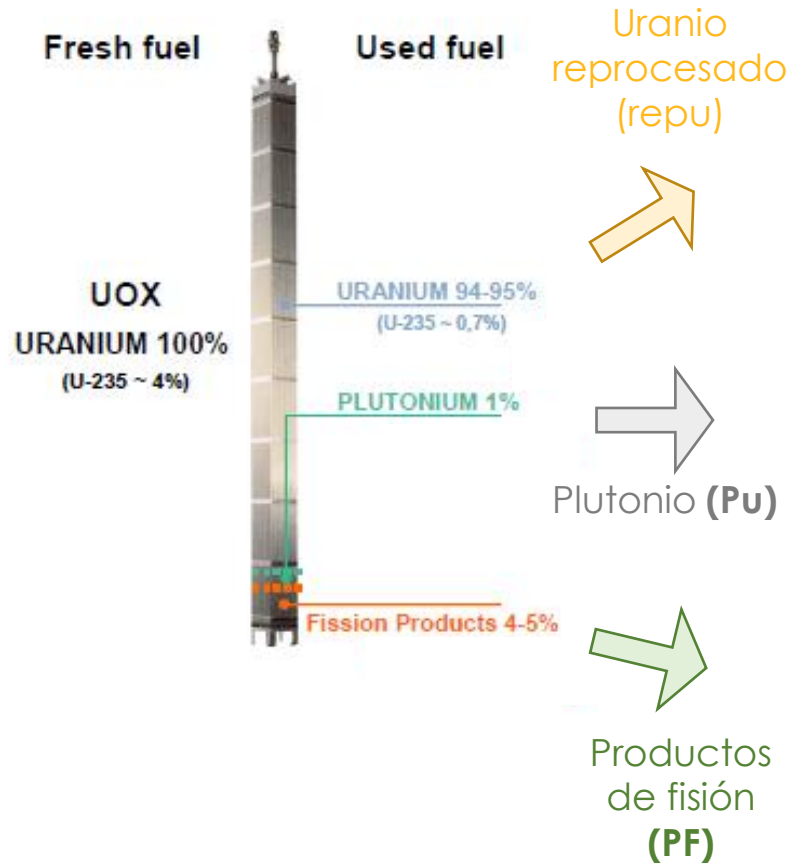
**DRY STORAGE AT REACTORS**



**DEEP GEOLOGIC DISPOSAL**



## CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR Reprocesado



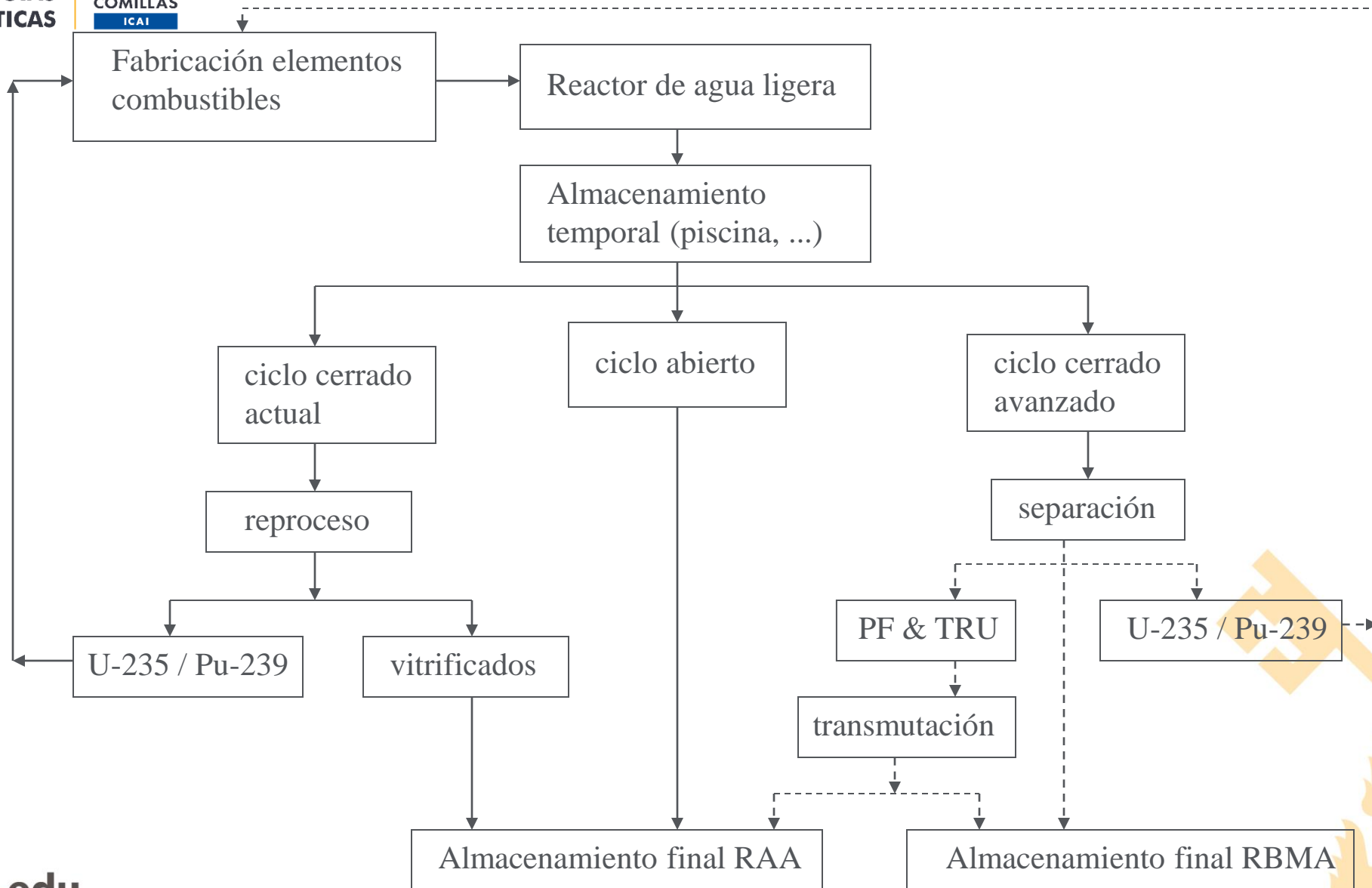
- Todavía queda 0,5-1%  $U_{235}$
- Se han formado algunos isótopos (U-236 and U-234) que complican la conversión y enriquecimiento
- Se puede emplear para fabricar nuevos elementos combustibles 100% de uranio (UOX) o de óxidos mixtos (MOX)

- Se puede incluir en los MOX o considerarse residuo
- El empleo de MOX en el reactor implica modificaciones importantes
- Los inventarios se han de controlar para evitar el empleo del Pu en armas nucleares (proliferación)

- Actualmente, los PF se concentran y vitrifican en cápsulas, fáciles de manejar y listas para una gestión posterior



## CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR



## RESIDUOS RADIACTIVOS

### Definición

□ **Residuo Radiactivo:** Cualquier material o producto de desecho para el que no está previsto ningún uso y que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía.

- **Caracterización:**
- Estado físico (sólido, líquido o gaseoso)
  - Tipo de emisor (alfa, beta, gamma)
  - Período ( vida corta < 30 años; vida larga)
  - Actividad específica (alta o baja)
  - Radiotoxicidad (peligrosidad biológica)
    - Grupo A (alta): Ra226, Pu239; Am241
    - Grupo B (media-alta): Sr90, I131
    - Grupo C (media-baja): P32, Au198; Mo99
    - Grupo D (baja): H3, Cr51, Tc99; Uranio natural





### □ Residuos de baja y media actividad

- BAJA actividad específica por elemento radiactivo
- NO generan calor
- Radionucleidos emisores  $\beta$ - $\gamma$  de  $T_{1/2} < 30$  años
- Contenido en emisores  $\alpha < 0.37$  GBq/t
- Ejs.: Cs137, Sr90, Co60

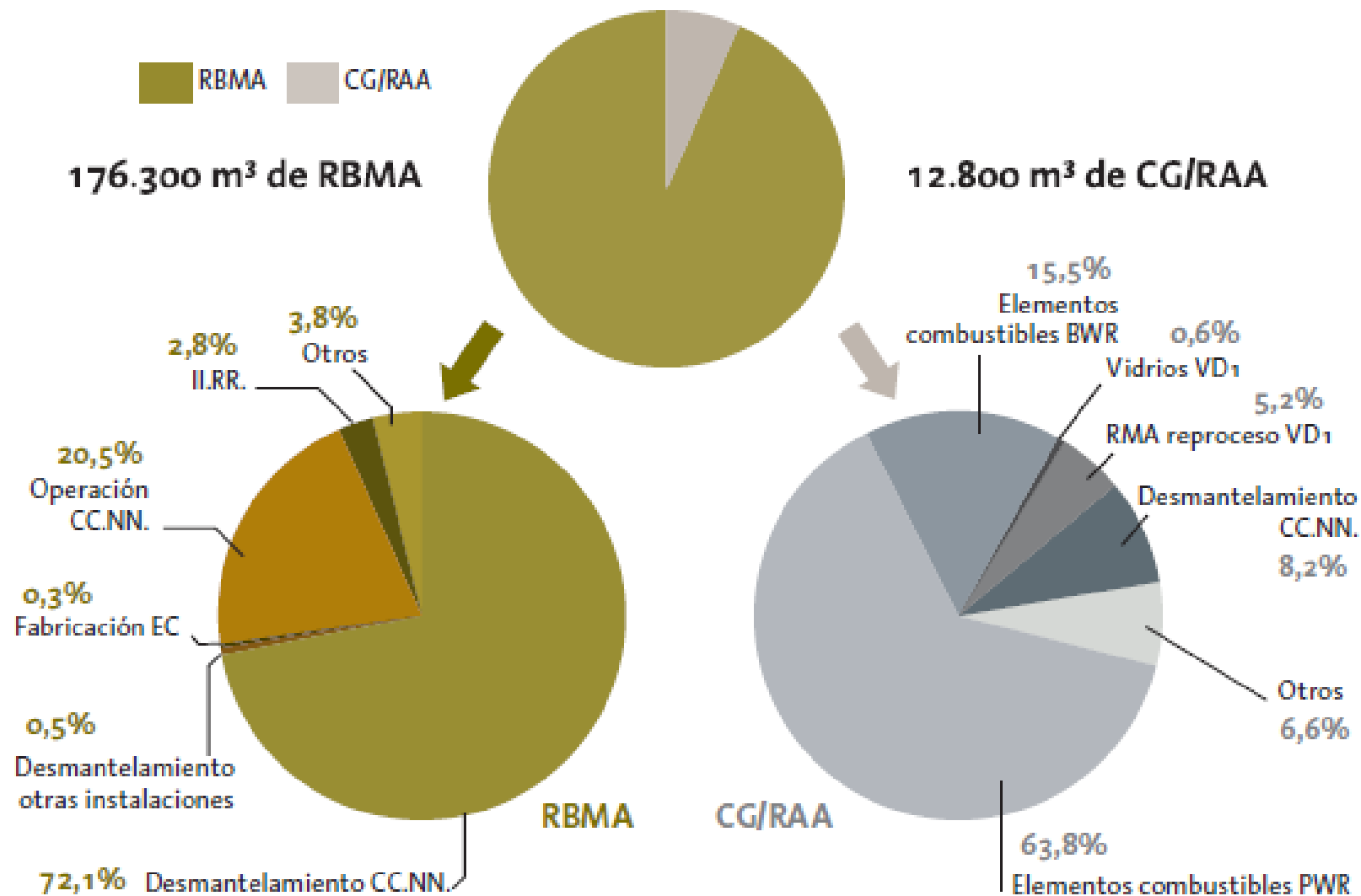
### □ Residuos de alta actividad:

- Contenido en emisores  $\alpha$  de vida larga  $> 0.37$  GBq/t
- Pueden generar calor
- Período de semidesintegración,  $T_{1/2} > 30$  años
- Ejs.: Am241, Pu239



## RESIDUOS RADIACTIVOS Producción en España

Figura B.3. Cantidades de residuos radiactivos a gestionar en España



- **Objetivo:** Inmovilizar y aislar los residuos radiactivos durante el período de tiempo necesario, mediante la interposición entre ellos y el ser humano de una serie de barreras artificiales y naturales que impidan la llegada de los radionucleidos al medio ambiente, hasta que hayan perdido su actividad.

- **Sistema de barreras múltiples (4)**

- **Barrera química**

- Cemento, asfalto, polímero (MB)
    - Vitrificación (A)

- **Barrera física:**

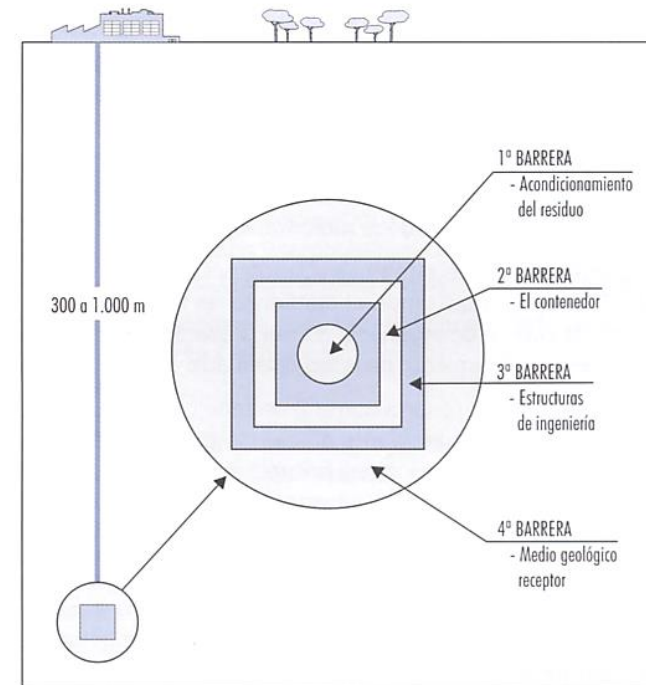
- Bidones metálicos normalizados (MB)
    - Recipientes metálicos especiales con

metales

altamente resistentes a la corrosión (A)

- **Barrera de ingeniería:** Estructuras, blindajes y otros sistemas

- **Barrera geológica:** Altamente estable e impermeable



[Baró, 2000]

## RESIDUOS RADIACTIVOS Gestión Baja y Media actividad

Almacenamiento en tierra firme una vez acondicionados. Existen dos opciones:

→ **En superficie** (El Cabril, L'Aube)

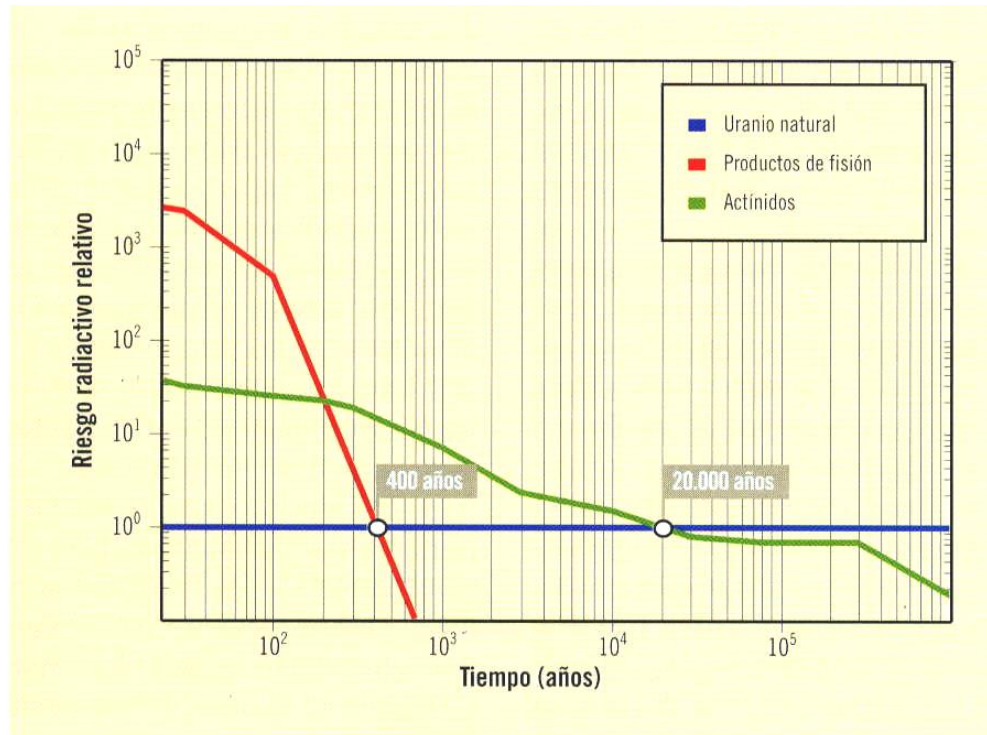
→ **Subterráneo a baja/media profundidad** (SFR, Konrad y Asse)



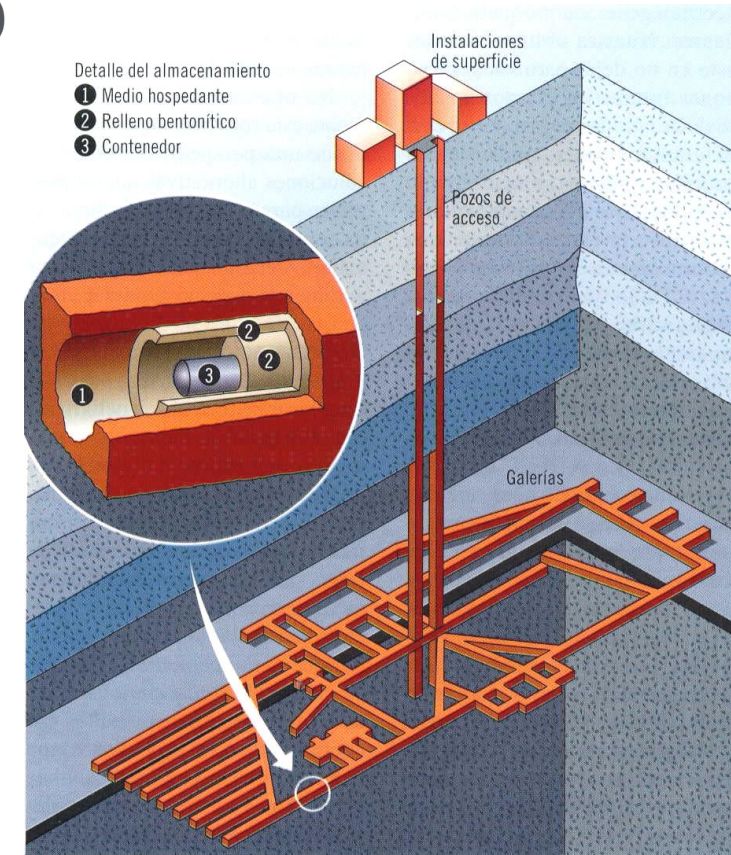


De los métodos considerados, los establecidos en amplio consenso internacional son:

→ Almacenamiento Geológico Profundo (AGP)

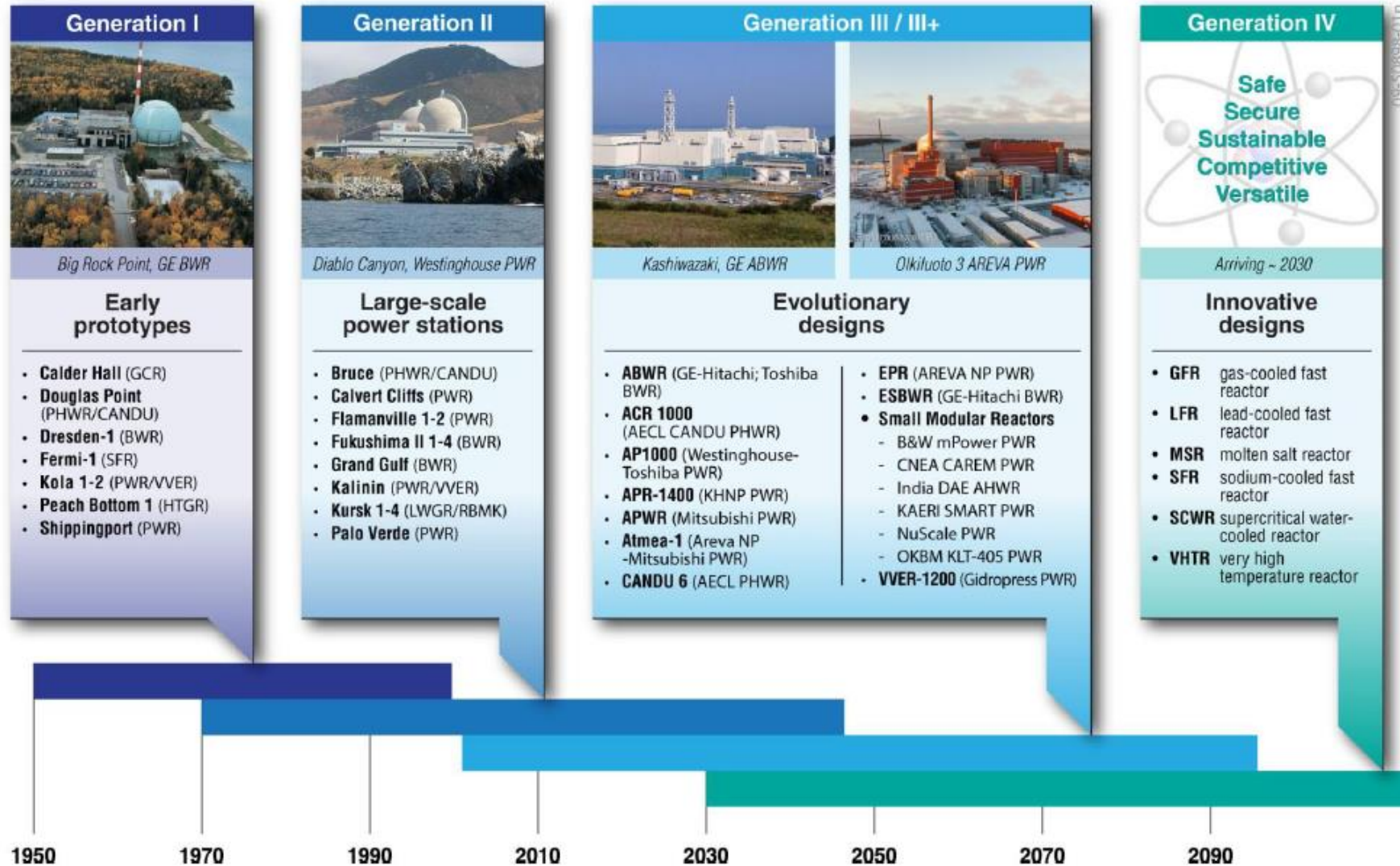


→ Transmutación (en investigación)



[<http://www.terralia.com/revista15/pagina35.htm>]

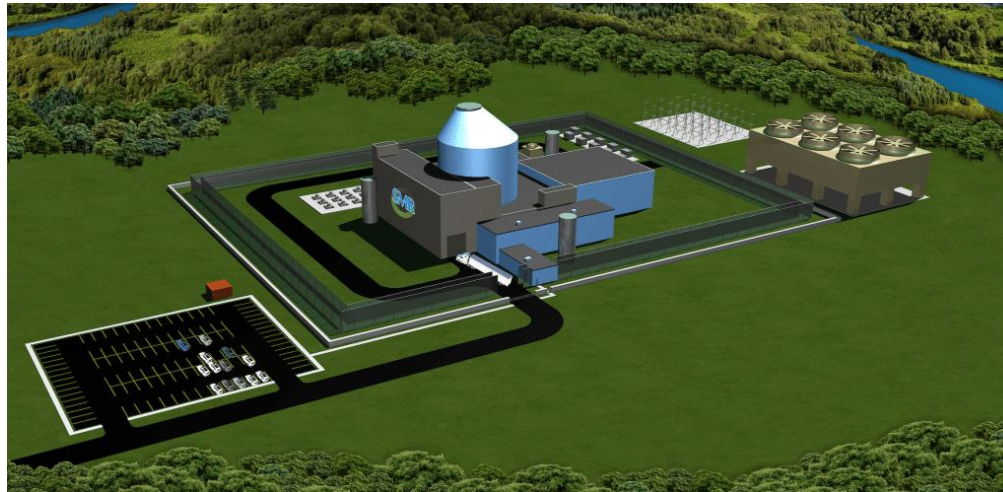
## Tipos de reactores nucleares Generaciones





Los **Small Modular Reactors** (SMRs) están empezando a considerarse como una alternativa real para el futuro de la energía nuclear en países como USA, Canadá, Reino Unido o Sudáfrica. Sus principales características son:

- Poca ocupación en planta y potencia reducida (<300 MWe). Esto les permite una mayor integración en las redes eléctricas
- Diseño y construcción modular, reduciendo el tiempo para la puesta en marcha y con ello los costes financieros
- Diseños muy diferentes, incluyendo PWR y BWR, pero también reactores rápidos y otras tecnologías
- Estrategias de ciclo de combustible para reducir la producción de residuos



SMR160, Small Modular Reactor from Holtec [Source: [www.holtecinternational.com](http://www.holtecinternational.com)]





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

# Gracias por su atención

[ymoratilla@comillas.edu](mailto:ymoratilla@comillas.edu)

comillas.edu

