

## 原子炉システム設計

### 概要 / 目的:

なぜ第4世代原子炉システムが必要なのでしょう？そしてどのような原子炉テクノロジーが必要なのでしょう？ GIFは過去の設計オプションを再検討し、持続可能なエネルギー源としての新しい原子炉設計を模索しています。第4世代原子炉システムの合理性を理解し、その設計上の特徴を把握するためには、原子炉設計の基本的知識が必要となります。「臨界」「増殖」「高速中性子／熱中性子」という技術用語の背景にある意味合いはどのようなものなのか？冷却材、減速材、中性子スペクトル、燃料組成、燃料材料はどのように選択すればよいのか？第4世代原子炉の基準を満たし持続可能な原子炉システムを設計するためには、これらの技術をどのように組み合わせればよいのか？非専門家への解説を目的とするウェビナーとなっています。

### 講演者紹介:

Claude Renault博士は、CEAで30年以上にわたり研究開発と教育に従事してきました。CEAのシニアエキスパートであると同時に、教授職にも就いていました。2010年に、国立原子力科学技術研究所 (INSTN) に移籍し、現在は国際プロジェクトリーダーを務めています。研究及び教育領域は、主に熱流動、原子炉設計と原子炉の運転の分野であり、第4世代の概念を含む多様な形式の原子炉に関する知識を有しています。1984年にCEAに入社し、加圧水型原子炉(PWR)の熱過渡現象シミュレーションコードCATHAREの開発チームに所属しました。その後、シビアアクシデント(ASTEC)や核燃料挙動(PLEIADES)の分野で、国内外の研究開発プロジェクトを担当しています。

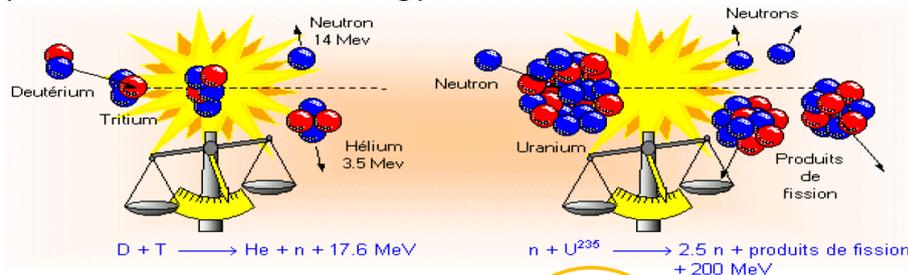
2001年から2009年にかけては、将来の原子炉に関する研究開発プログラムの策定に従事しました。原子力局(CEA/DEN)で、第4世代原子炉の研究プログラムの策定を行うとともに、GIFの溶融炉の運営委員会の委員長を務めました。



# なぜ核分裂エネルギーを利用するのか？

## Fission, fusion, fossil fuel burning?

The potential of nuclear energy is fantastic!



Combustion of 1 ton of fossil oil:	0.5 MWd	(42 GJ)
Total fission of 1 g of <sup>235</sup> U:	1 MWd	(83 GJ)
Total fusion of 1 g of fuel (D,T):	4 MWd	(330 GJ)

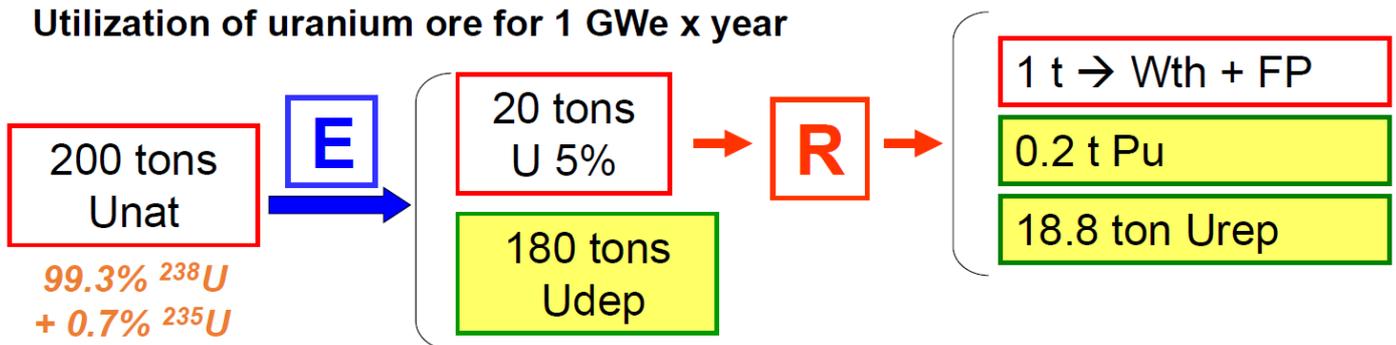
6

**2,000,000 倍** のエネルギー利用が可能だから。石炭、石油、ガスといった化石燃料と比較すると格段にエネルギー利用効率が高い。

## Why is a new generation of nuclear reactors needed?

### Open cycle in LWRs

Utilization of uranium ore for 1 GWe x year



In PWRs, about 5% of the initial uranium set in reactor (enriched U) is consumed for electricity production (fuel technological limits)

**This represents only 0.5-0.6% of the initial natural uranium**

**Breeder reactors (FNRs)** need only 1 ton U<sup>238</sup> (Udep & Urep) that is converted into plutonium and burned in situ (*regeneration* → *breeding of fissile fuel*)

24

軽水炉では**200 tons U** が1GWの電力生産に必要。

高速炉では**1 ton U<sup>238</sup>** でよい。

そのため、発電用の動力炉としては、高速炉が当初より開発された (EBR-1, 1951 USA Idaho: ウラン金属燃料、冷却材NaK)。

沸騰水型軽水炉による発電も1955年にBORAX-IIIにより実証。

# What is the condition for self-sustained reaction?

A necessary condition for criticality is that the reproduction factor  $\eta$  is significantly larger than 1

$$k = \frac{\bar{\nu} \frac{\sum_f}{\sum_a}}{1 + \frac{AR_{other} + LR}{AR_{fuel}}}$$

Reproduction factor  $\eta$  for uranium fuel (fissile fraction e):

Fissile fraction e	0.71 % (U nat)	3 %	10 %	15 %	100 %
For fast neutrons	0.10	0.35	0.85	1.07	1.88
For « thermal » neutrons	1.33	1.84	2.00	2.02	2.07

The chain reaction is not possible with natural uranium and fast neutrons.

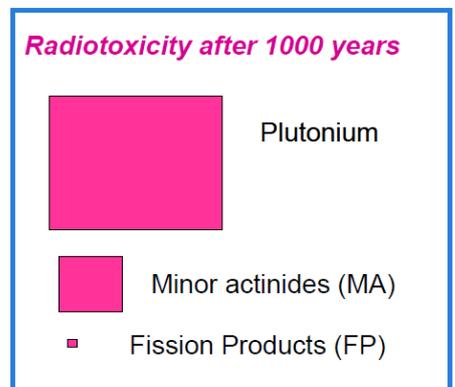
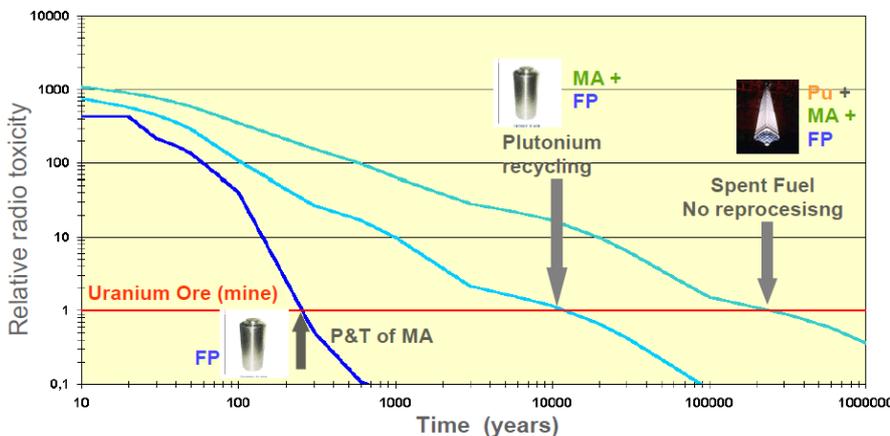
Therefore 2 solutions:

- to slow down neutrons (criticality possible whatever the fissile content, Unat possible for strict neutron economy)
  - Thermal Neutrons Reactors, TNR (PWR, BWR, CANDU,...)
- to use fast neutrons and subsequently increase the fissile fraction in the fuel
  - Fast Neutrons Reactors, FNR

必要となる燃料の組成は、熱中性子及び高速中性子を用い、核反応を維持するために必要となる炉心の条件によって決定される。

## Why Fast Neutron Reactors? The waste management issue

- Plutonium is the major contributor to the long term radiotoxicity of spent fuel → **Plutonium recycling**
- After plutonium, MA (Am, Cm, Np) have the major impact to the long term radiotoxicity → **MA transmutation**



The ratio fission/capture is favourable to MA fission with fast neutrons

1000年後の放射性物質の量や強さを検討することで、どの物質を再使用あるいは核変換すればよいのかという方向性が見えてくる。

# General characteristics of nuclear reactors in operation

Reactor type	Fuel type	Moderator	Coolant	Core power density (MW/m <sup>3</sup> )	Pressure (bar)	Temperature (°C)	Efficiency (%)
UNGG	Unat	C	CO <sub>2</sub>	1	41	400	30
Magnox							
PHWR		D <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	12	130	300	30
LWGR	U 1-2%	C	H <sub>2</sub> O	2	70	284	31
AGR		C	CO <sub>2</sub>	3	40	645	40
BWR	U 3-5%	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	50	72	288	37
PWR				100	155	330	35
FBR (FNR)	Pu 20-30%	-	Na	500	1	550	40

	SFR	LFR	GFR	VHTR	SCWR	MSR	PWR
Neutron spectrum (T/F)	F	F	F	T	T/F?	T/F	T
Moderator				graphite	H <sub>2</sub> O (or D <sub>2</sub> O)	graphite (or none)	H <sub>2</sub> O
Coolant	Na	Pb (or Pb-Bi)	He	He	H <sub>2</sub> O	molten salt	H <sub>2</sub> O
Fuel type	MOX (pins)	nitride (pins)	carbide	carbide (particles)	UOX, MOX	liquid fuel (U, Pu, Th)	UOX, MOX
Core outlet t° (°C)	550	500	850	> 900	550	700	330
Primary pressure (MPa)	0.1	0.3-0.4	7	5-8	25	0.1-0.2	15.5
Core power density (MW/m <sup>3</sup> )	240	140	100	4-6	100	20-300	100

The values given in the table are fairly indicative!

各炉型の炉心設計を行い、燃料や炉心出力密度、系統パラメータなどを決めていく。

第4世代原子炉の特徴を活かすことで、原子力エネルギーの利用が持続可能な形で可能となる。

## GIF and a new generation of nuclear systems

*Nuclear is a CO<sub>2</sub>-free option for sustainable energy*

### New requirements for sustainable nuclear energy

#### Search innovative solutions for:

- Waste minimisation
- Natural resources conservation
- Proliferation resistance

#### Perform continuous progress on:

- Competitiveness
- Safety and reliability

#### Develop the potential for new applications:

hydrogen, syn-fuels, desalinated water, process heat



→ Systems marketable from 2040 onwards