

Simultaneous Satisfaction of Resource Demand
and Environmental Protection
within the Confines of Assets of Nuclear Fission Reaction



Requirements for Science & Technology in the 21st Century

Utilization to Harmonization

Industrial Revolution

- Diversification of resources
- Mass consumption of energy

By-Products :
NO_x, Sox, etc.

Global warming
by CO₂ emission

Turning Point of
Fossil – Fuel Based
Civilization



Restricting Unlimited Use of Fossil Resources

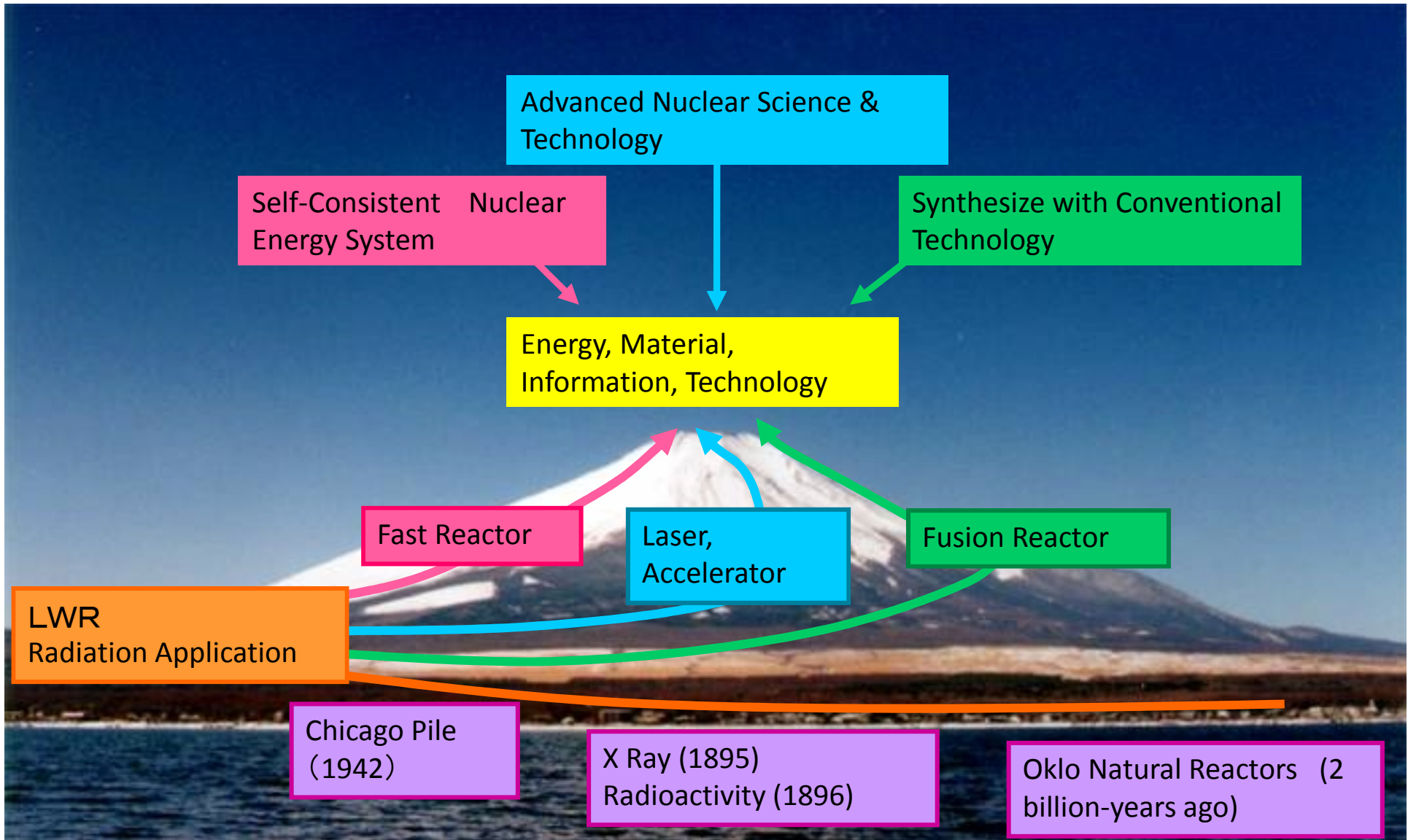
- Ethics based on harmonization
- Regulation
- Technical countermeasures

Requirements for Future Science & Engineering Will it be a balanced and comprehensive technology ?

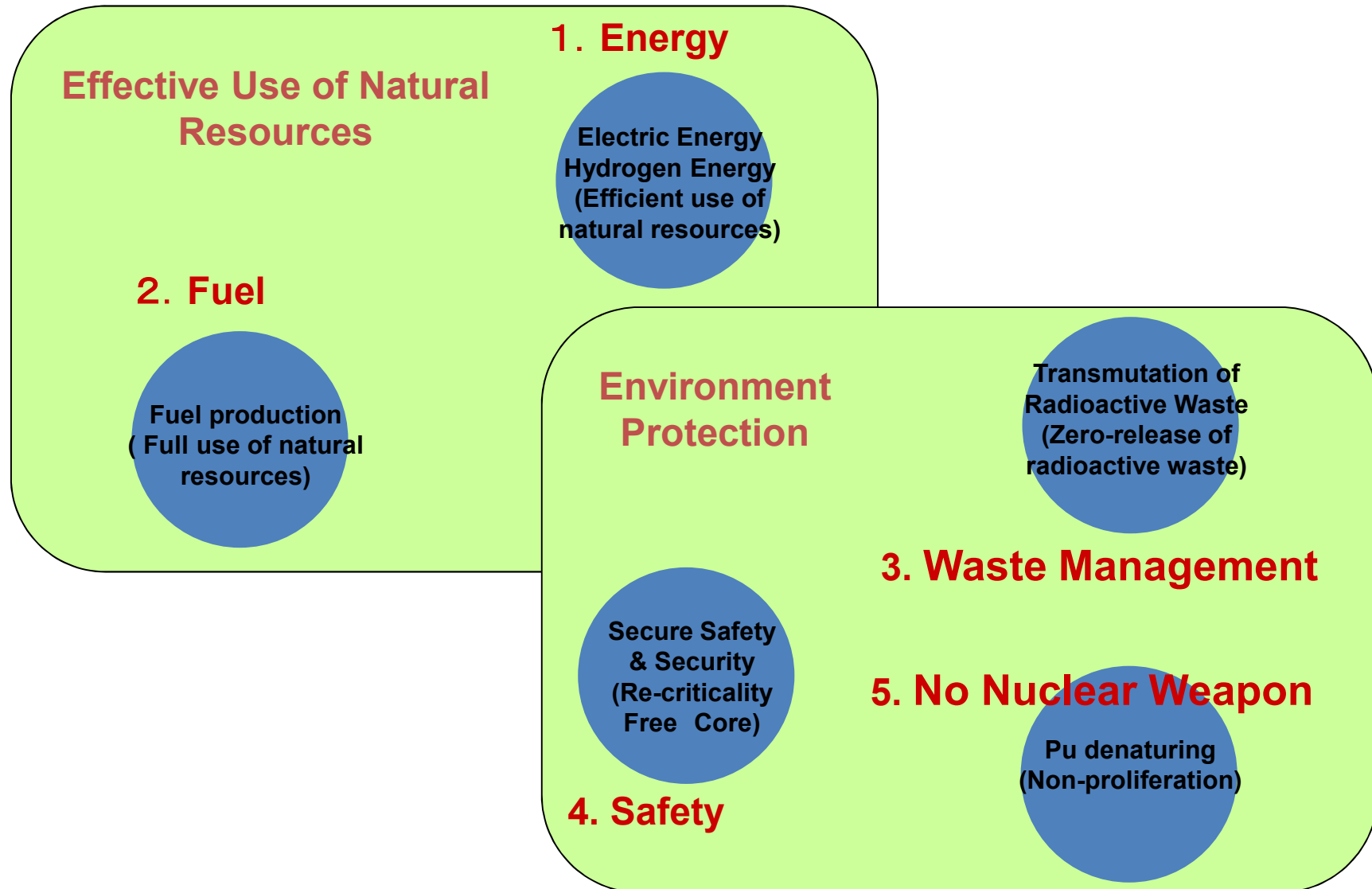
- provide new knowledge to the human society
- develop new fields of science and technology
- accept and support the civilization
- harmonize with the environment and society



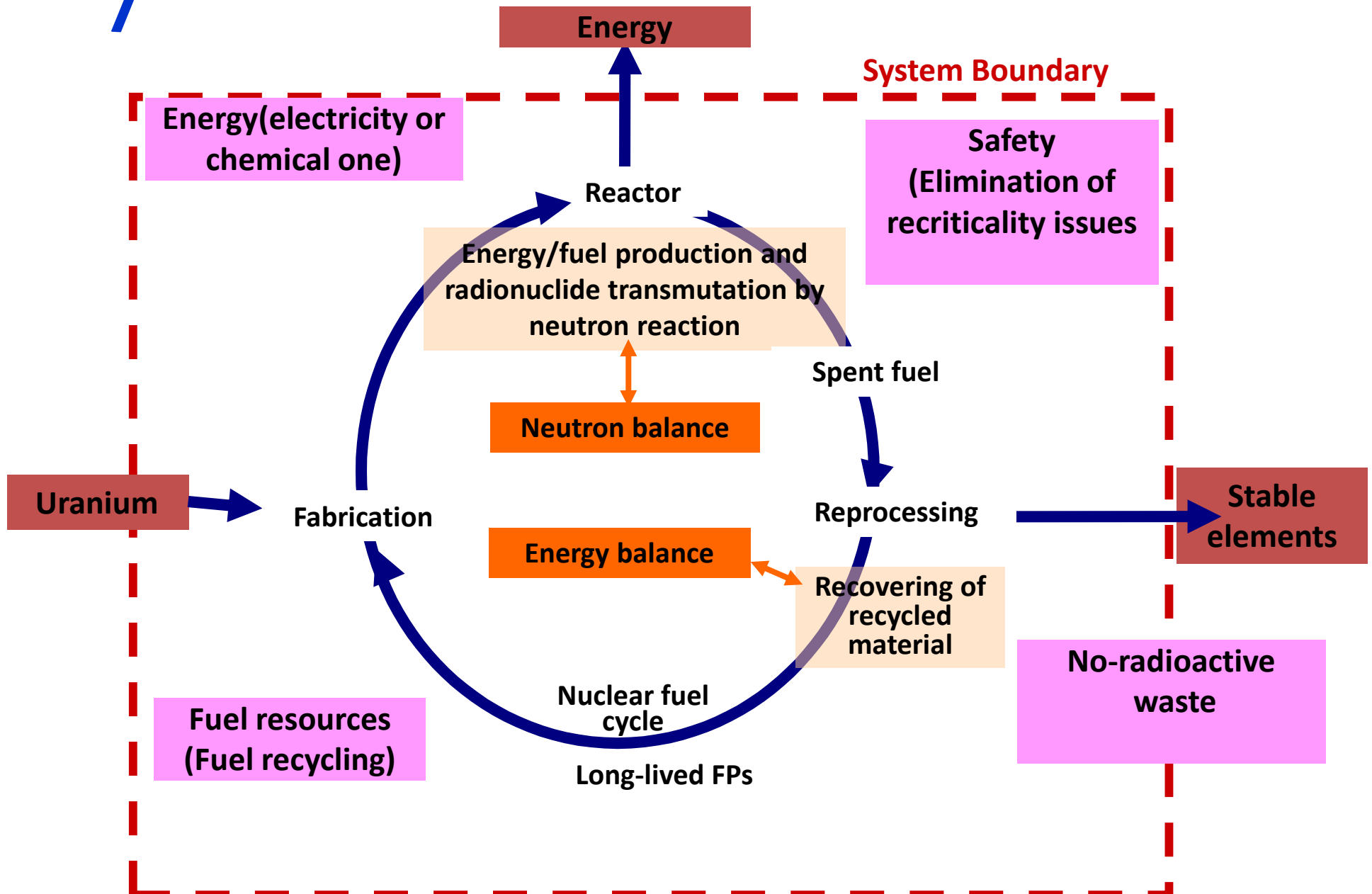
Long Term Prospect for Nuclear Development



Nuclear Energy System with 5 Objectives satisfied Simultaneously



NSF Future Nuclear Energy System and its Target



Energy Balance (Table A)

Items		Energy (MeV/fission)	
Produced Energy	1. fission reaction		
	thermal energy	E_f	200
Consumed Energy	1. Energy loss at power plant		
	energy loss due to conversion	E_{r1}	118
	other consumptions	E_{r2}	8
	2. Energy loss at fuel cycle		
	reprocessing & fabrication	E_{c1}	< 0.2
	LLFP nuclide separation	E_{c2}	< 1
	LLFP multi-recycling	E_{c3}	< 0.1
Usable Energy	1. Obtained energy		
	electricity	E_e	73



SCNES neutron balance

number of neutrons per fission	oxide fuel core	metal fuel core
Consumption		
1. Chain reaction		
fissile fission	0.8	0.72
fertile fission	0.2	0.28
2. Breeding (fertile capture) (BR=1.0)	1	0.85
3. FP transmutation (with isotope separation)	0.24	0.24
4. Parasitic capture		
fissile capture	0.2	0.13
others	0.25	0.2
5. Parent nuclide capture for non-proliferation	0.2 (available)	0.5 (available)
Fission yield	2.9	2.9

It is required to achieve non-proliferation by the addition of Np237, Am241 and Am243 to fuel under the condition of the available neutrons.

Future Nuclear Energy System needs Fuel Cycle with Isotope Separation

A Nuclear Fission generates about 2.9 neutrons

- for chain reaction needs 1 neutron
- for fuel production needs more than 1 neutron
- for transmutation of radioactive FP needs about 0.6 neutron
(considering neutron absorption and leakage)

Isotope separation below makes it possible

FP	$T_{1/2}$	lower limit (Year)	1	3	10	20	30	100	200	2000	50000
Absorption (n/fiss.)	Element-wise Separation		6.78	2.07	1.99	1.23	1.12	1.07	0.95	0.95	0.95
	Isotope-wise Separation		0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.22	0.22	0.22	0.22



Neutron Balance in SCNES with Proliferation Resistance

-Pu Grade Target: Reactor Grade Pu-

Neutron Reactions	Core Fuel		Requirement
	MOX	Metal	
1. For Chain Reaction Pu Fissile Fission (N_{fis1}) Others Fission (N_{fis2})	<u>1.00</u> 0.80 0.20	<u>1.00</u> 0.72 0.28	$N_{fis1} + N_{fis2} = 1.0$
2. For Fuel Production (Pu Fissile Production) ^{238}U , ^{238}Pu , ^{240}Pu , capture (N_b)	<u>0.98</u> 0.98	<u>0.83</u> 0.83	Breeding Ratio = $(N_b + N_{p2}) / (N_{fis1} + N_{p1}) \geq 1.0$
3. For Pu Protection (Target: Rea. Grade Pu, (N_p)) Pu Fissile, ^{239}Pu , ^{241}Pu , capture (N_{p1}) ^{237}Np , ^{241}Am Capture (N_{p2}) ^{243}Am Capture (N_{p3})	<u>0.24</u> 0.20 0.02 0.02	<u>0.16</u> 0.13 0.02 0.01	$(N_p) / N_b \geq 0.18$ \geq Reactor Grade Pu or N_{SFN} [n/s/kgPu] \geq Reactor Grade Pu
4. For LLFP Transmutation LLFP capture (N_{fp})	<u>0.24</u> 0.24	<u>0.24</u> 0.24	$T_{1/2} > 1$ year FP Transmutation with isotope separation
5. Others	<u>0.21</u>	<u>0.17</u>	
Total	<u>2.69</u>	<u>2.42</u>	
Generated Neutron by Fission	<u>2.90</u>	<u>2.90</u>	

1) Fundamental Data are derived from "Yoichi Fujie", Masao Suzuki, "Nuclear Energy System for a Sustainable Development Perspective -Self-Consistent Nuclear Energy System-", Progress in Nuclear Energy, Vol. 40, No. 3-4, pp. 265-283, 2002"

Re-composed by H. Sagara

2) MA composition data at equilibrium state are derived from "A. Mizutani, A. Shono and M. Ishikawa, "Investigation of Equilibrium Core by Recycling MA and LLFP in Fast Reactor Cycle(I)," JNC TN9400 99-043 (1999)

Safety of SCNES with Re-criticality Free Reactor Core

- The safety aspects of a nuclear energy system are discussed sometimes from its inherent safety characteristics. In other words stop, cool and contain. The essential safety measure is to avoid that the radioactive material should have mobility to move outside the system to the environment during meltdown of the core.
- Especially in fast reactor system, since the criticality issues for both normal and abnormal operation condition are related to the principal safety characteristics of fast reactor core configuration. It means that the core does not show the maximum reactivity configuration related to the material relocation.
- On the contrary, concerning to the cooling ability of the system it is possible to apply a system with high heat transport material with low pressure operation like sodium cooled system
- Treatment of HCDA issues like UTOP and ULOF have been made for the safety assessment of FBR in the world even the occurrence probability is negligibly small like $10^{-7}/(\text{reactor x year})$.
- In SCNES we also put our focus on the re-criticality problem.
- If we consider the low occurrence probability, it is not possible to equip such a system with active element as a safety circuit. We decided to introduce a safety system to make use of physical properties like a melting point and relocation due to phase change in the existence of gravity.
- a fast reactor system.
-



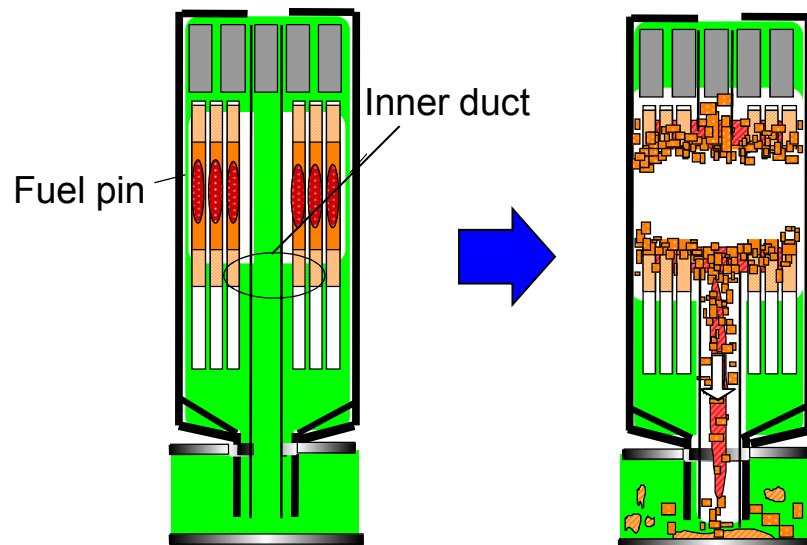
Objective and outline of EAGLE-project

Objective:

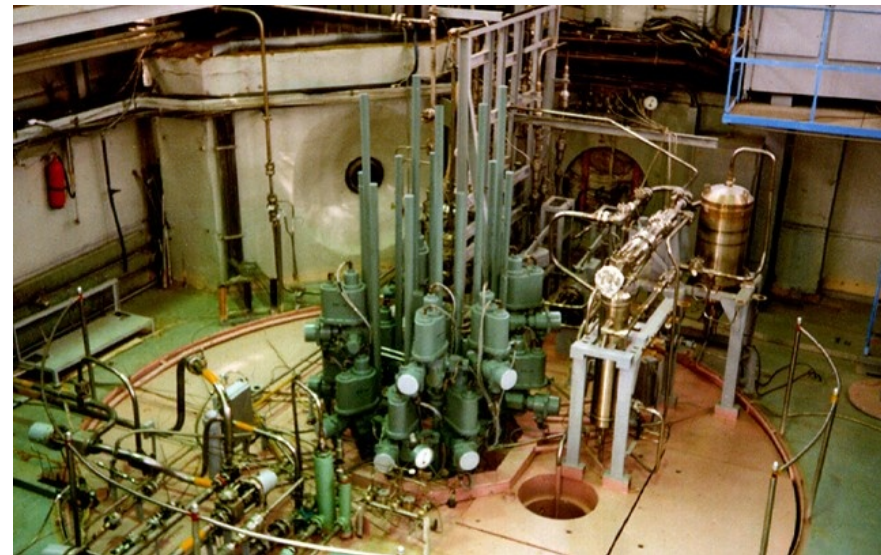
Confirm that the “re-criticality issue” would be eliminated from the CDA scenario by the early fuel-discharge from the core region, with clarifying the necessary design conditions for the re-criticality free core.

Approach:

- Use IGR and Out-of-pile apparatus of the NNC/Kazakhstan



Example of discharge-enhancing design and discharge phenomena



IGR (Impulse Graphite Reactor)

表5 オクロ鉱床の天然原子炉No.2跡における核分裂生成物とアクチニドの移動

	分類	元素/核種	振る舞い	崩壊
核分裂生成物	希ガス	クリプトン Kr	痕跡程度残留	
		キセノン Xe	0.01~1%	
	アルカリ金属元素	ルビジウム Rb	痕跡程度残留、1%以下	
		セシウム Cs	Baとして痕跡程度残留、大部分は散逸	^{137}Cs (半減期30.1年) \rightarrow ^{137}Ba (現在) ^{135}Cs (半減期230万年) \rightarrow ^{135}Ba (現在)
	アルカリ土類金属元素	ストロンチウム Sr	痕跡程度残留、10%以下	
		ストロンチウム ^{90}Sr	少量が移動、大部分はその場で崩壊	^{90}Sr (半減期28.8年) \rightarrow ^{90}Zr (現在)
		バリウム Ba	大部分が散逸	
	遷移金属元素	ジルコニウム Zr	大部分が原子炉ゾーン内で移動	
		ニオブ Nb	大部分が残留	
		モリブデン Mo	90%程度散逸	
		テクネチウム 99 ^{99}Tc (現在ルテニウム)	Tcとして移動、原子炉ゾーン内で移動	^{99}Tc (半減期21.1万年) \rightarrow ^{99}Ru (現在)
		ルテニウム Ru	大部分が残留、原子炉ゾーン内で移動	
		パラジウム Pd	大部分が残留	
		銀 Ag	大部分が残留	
		カドミウム Cd	90%程度散逸	
	カルコゲン	テルル Te	大部分が残留	
	ハロゲン	よう素 I	大部分が散逸	
	半金属元素	ビスマス 209 ^{209}Bi	大部分が残留	$(^{241}\text{Pu}\rightarrow^{237}\text{U}\rightarrow^{237}\text{Np})$ $^{237}\text{Np}\rightarrow\cdots\rightarrow^{209}\text{Bi}$ (安定核種)
	典型金属元素	鉛 Pb	再配分、約2/3が炉心から失われた	$^{232}\text{Th}\rightarrow\cdots\rightarrow^{208}\text{Pb}$ (安定核種) $^{238}\text{U}\rightarrow\cdots\rightarrow^{206}\text{Pb}$ (安定核種) $^{235}\text{U}\rightarrow\cdots\rightarrow^{207}\text{Pb}$ (安定核種)
	ランタノイド (希土類)	セリウム Ce	非常にわずかの部分のみ移動	
ネオジウム Nd				
サマリウム Sm				
ガドリニウム Gd				
アクチニド	トリウム 232 ^{232}Th	大部分が残留	$^{240}\text{Pu}\rightarrow^{236}\text{U}\rightarrow^{232}\text{Th}$	
	ウラン 235 ^{235}U	^{239}Pu は ^{235}U から分離されていない	$^{239}\text{Pu}\rightarrow^{235}\text{U}$	
	ウラン U	おそらく大きな移動は無かったと推定される。 一部が原子炉ゾーン内で移動		

(参考：E.A. Bryant, et al., "Oklo, an Experiment in Long-Term Geologic Storage," INIS-362879, ACS Symp. No.35, (1976))

表6 原子炉の使用済燃料中の核分裂とアクチノイド核種
(炉から取り出し直度、合計1トンあたり)

新燃料	炉型	PWR		FBR
	燃料形態	UO ₂	MOX	MOX
ウラン濃縮度	4.10%	天然ウラン	劣化ウラン	
Pu富化度	—	6.10%	18.50%	

使用済燃料	燃焼度	43GWd/t		150GWd/t	主な核種
核分裂生成物	半減期	重量%			
	1年以下	1.81	1.61	1.2	⁹⁰ Y, ⁹⁵ Nb, ¹⁰⁶ Rh, ¹²⁶ Sb, ¹⁴⁴ Ce
	1～10年	1.38	1.78	1.59	¹⁰⁶ Ru, ¹³⁴ Cs, ¹⁴⁷ Pm, ¹⁵⁵ Eu
	10～30年	1.63	0.84	0.85	⁸³ Kr, ⁹⁰ Sr
	30～100年	3.53	3.69	3.73	¹⁵¹ Sm, ¹³⁷ Cs
	100～1万年	5×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁵	
	1万～50億年	6.63	8.66	9.89	⁷⁹ Se, ⁹³ Zr, ⁹⁹ Tc, ¹⁰⁷ Pd, ¹²⁶ Sn, ¹²⁹ I, ¹³⁵ Cs
	50億年以上	7.85	6.02	6.68	⁸⁷ Rb, ¹⁴² Ce, ¹⁴⁴ Nd, ¹⁵⁰ Nd, ¹⁴⁷ Sm, ¹⁴⁸ Sm, ¹⁴⁹ Sm
	安定	77.17	77.4	76.06	
	総重量	44kg	43kg	149kg	
アクチノイド核種	半減期	重量%			
	1年以下	0.002	0.03	0.01	²⁴² Cm
	1～10年	—	—	—	
	10～30年	0.175	0.85	0.95	²⁴¹ Pu, ²⁴⁴ Cm
	30～100年	0.02	0.15	0.18	²³⁸ Pu
	100～1万年	0.28	1.02	6.88	²⁴¹ Am, ²⁴³ Am, ²⁴⁰ Pu
	1万～50億年	98.79	96.39	79.13	²³⁵ U, ²³⁶ U, ²³⁸ U
		0.07	0.01	0.06	²³⁷ Np
	50億年以上	0.66	1.53	12.75	²³⁹ Pu, ²⁴² Pu
		—	—	—	
総重量	956kg	956kg	847kg		

(参考：分離核変換工学専門委員会、「総説 分離変換工学」、日本原子力学会 (2004))

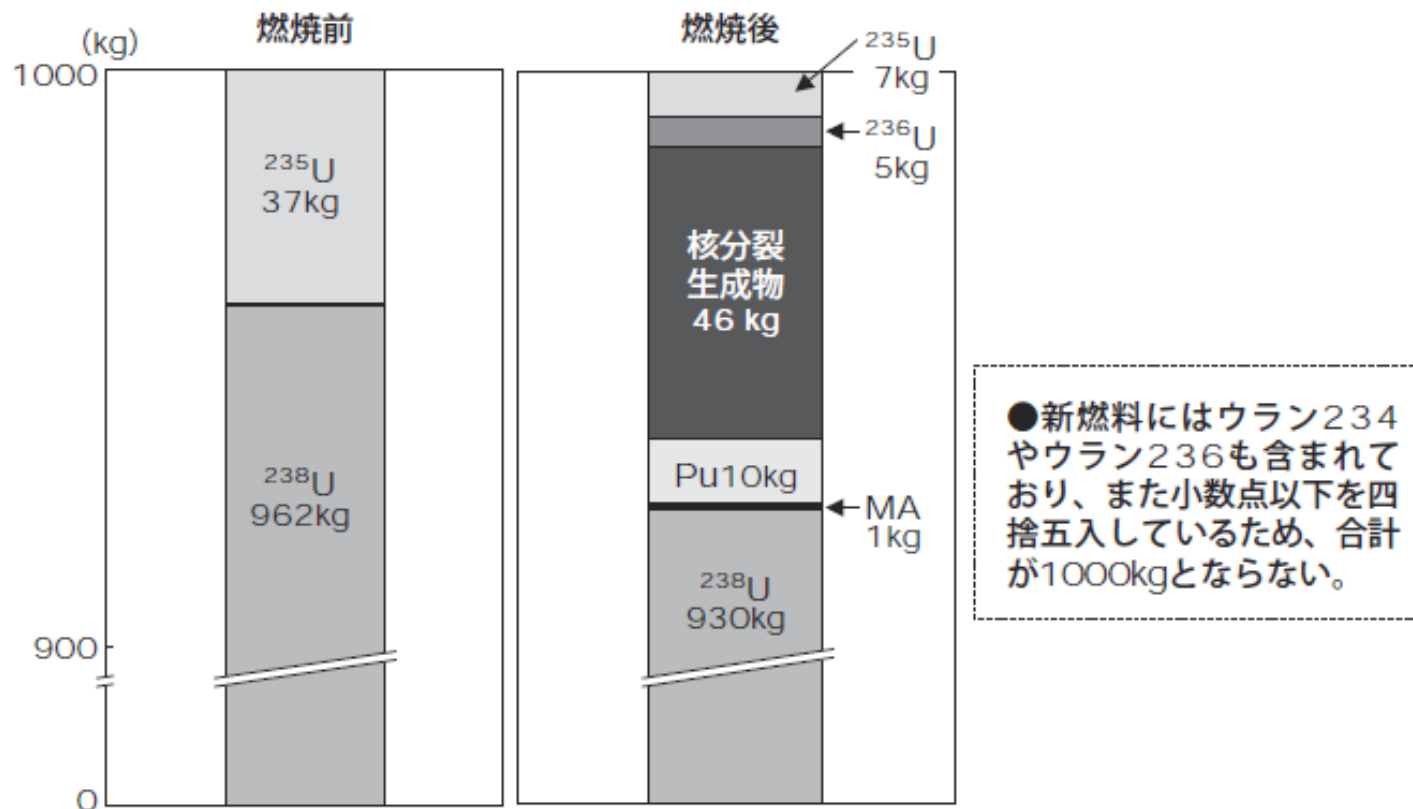


図7 軽水炉燃料の燃焼前後の組成の変化

(ABWR: 初期ウラン濃縮度3.7%、平均燃焼度45,000MWd/t)

表7 50, 100, 1000年後の放射性廃棄物の放射能比

原子力システム	種類	放射能比(放射性廃棄物の放射能*1/ 天然ウラン1トンの放射能*2)		
		50年後	100年後	1000年後
軽水炉(ワンスルー)	FP	280,000倍	94,000倍	110倍
	TRU	82,000倍	24,000倍	6,000倍
ウラン+プルトニウム リサイクル型高速炉	FP	280,000倍	94,000倍	110倍
	TRU	32,000倍	14,000倍	2,600倍
アクチニド リサイクル型高速炉	FP	280,000倍	94,000倍	110倍
	TRU*3	0倍	0倍	0倍
アクチニド+セシウム+ストロンチウム リサイクル型高速炉	FP	19,000倍	12,000倍	110倍
	TRU*3	0倍	0倍	0倍
アクチニド+7核種+セシウム+ストロンチウム リサイクル型高速炉	FP	19,000倍	12,000倍	8.8倍
	TRU*3	0倍	0倍	0倍
SCNES型高速炉(アクチニド+30核種 リサイクル型)	FP	0倍	0倍	0倍
	TRU*3	0倍	0倍	0倍

*1: 電気出力100万kWeの原子力発電所を1年間運転した際に発生する使用済燃料の下記年数経過後の放射能。

*2: 天然ウラン1トンの放射能として、崩壊系列の娘孫核種を含んだ値(1.8×10^{11} ベクレル(4.9キュリー))を用いた。娘孫核種を含まない場合の放射能は、 1.3×10^{10} ベクレル(0.35キュリー)となる。

*3: 超ウラン元素(TRU)は全てリサイクルされる(リサイクルロスをもと想定)。

原子力に期待される役割：利用から調和へ

～ 原子力の目指すところ ～

調和を目的とした科学技術としての原子力

リサイクル

資源を有効利用し、将来のための資源を十分に確保する

ゼロリリース

廃棄物を環境中に放出しない

原子力の特長

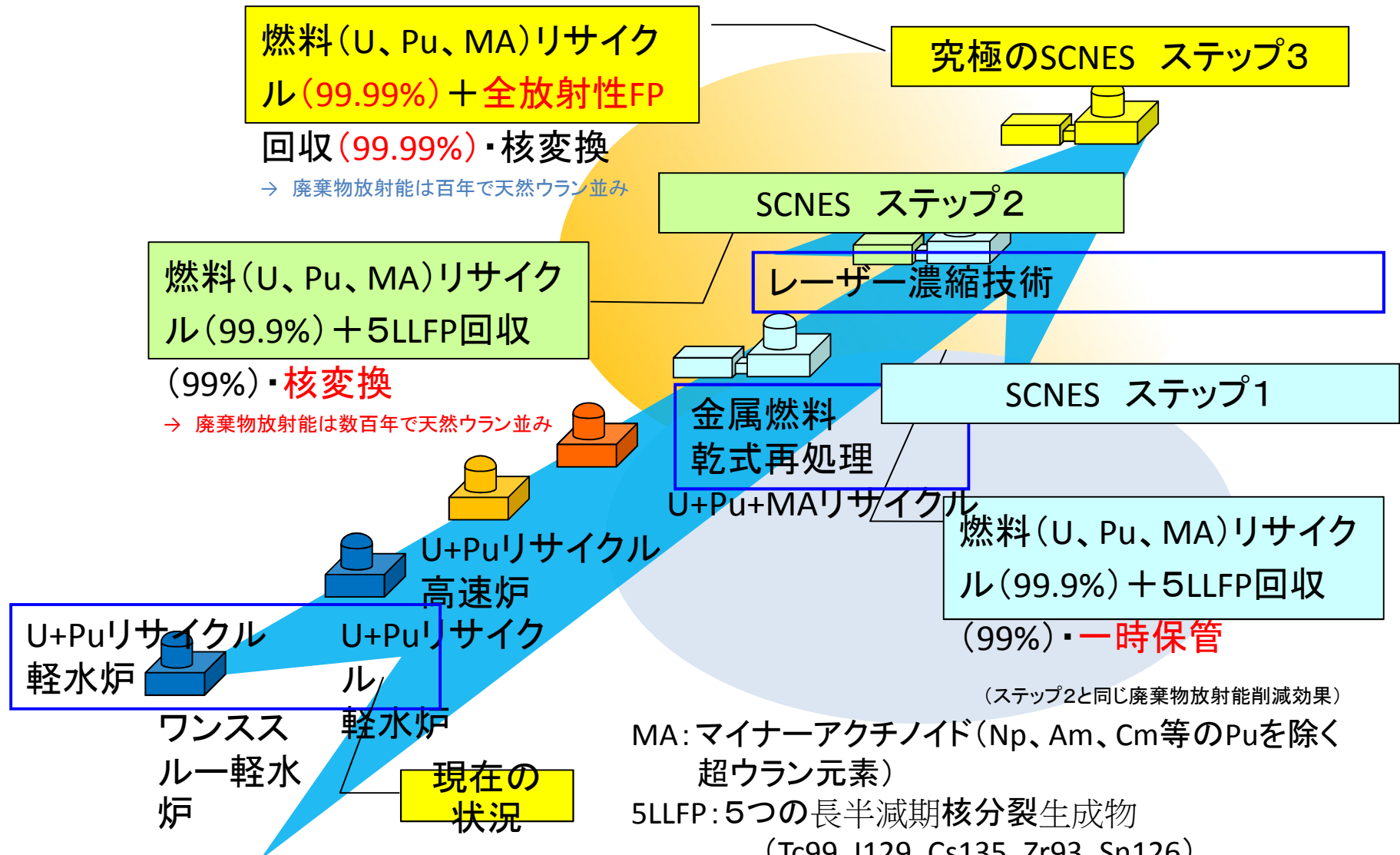
- 少ない燃料から大きなエネルギーを取り出せる
- 発生する廃棄物量が少ない



注意：電気出力100万kWの発電所を1年間運転した場合

図3 化石燃料と核燃料の量に比較

3. 段階的アプローチ



MA: マイナーアクチノイド(Np、Am、Cm等のPuを除く超ウラン元素)
 5LLFP: 5つの長半減期核分裂生成物 (Tc99, I129, Cs135, Zr93, Sn126)
 全放射性FP: 半減期1年以上の核分裂生成物(28FP)

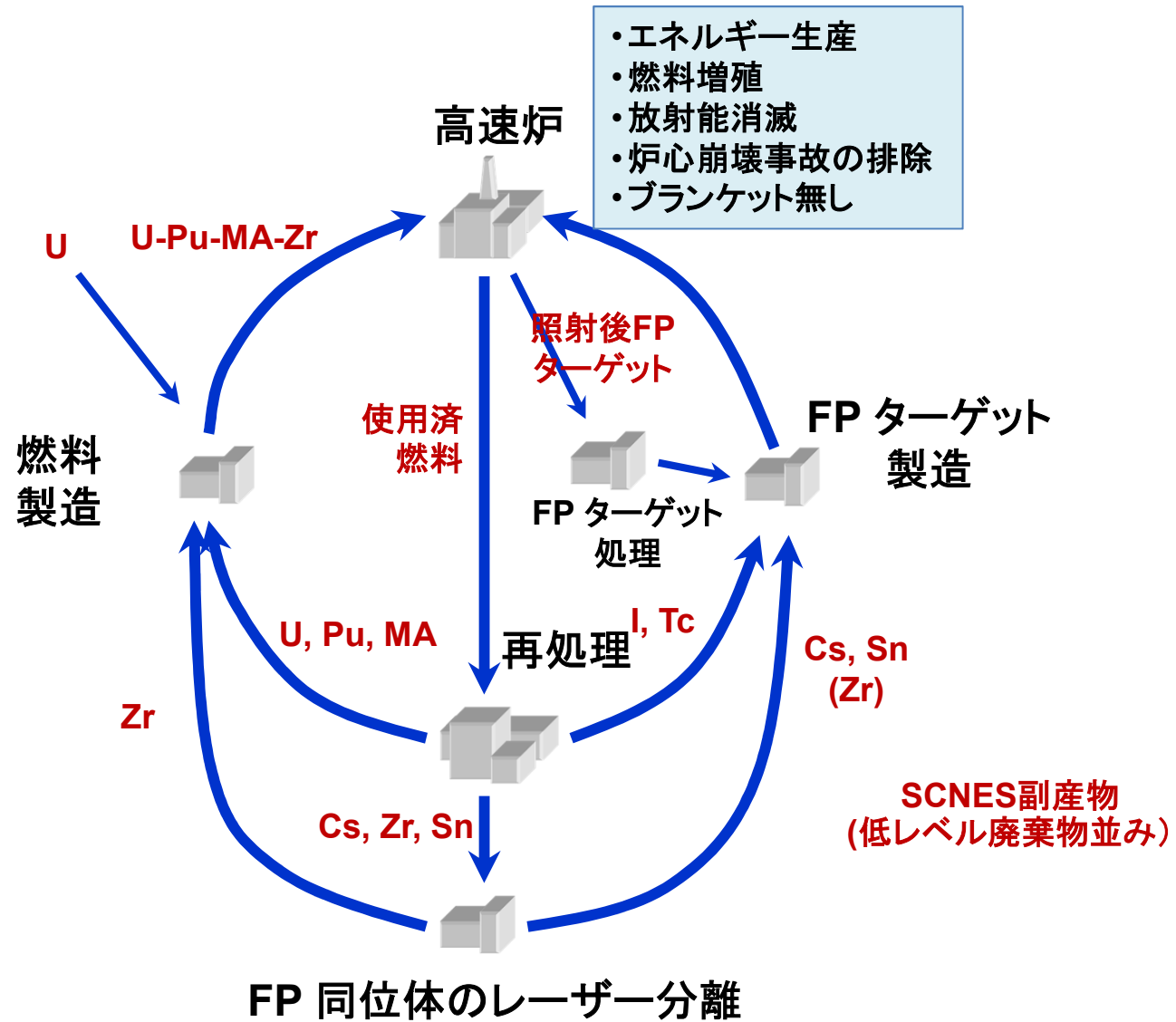


図5 SCNESの全体システム

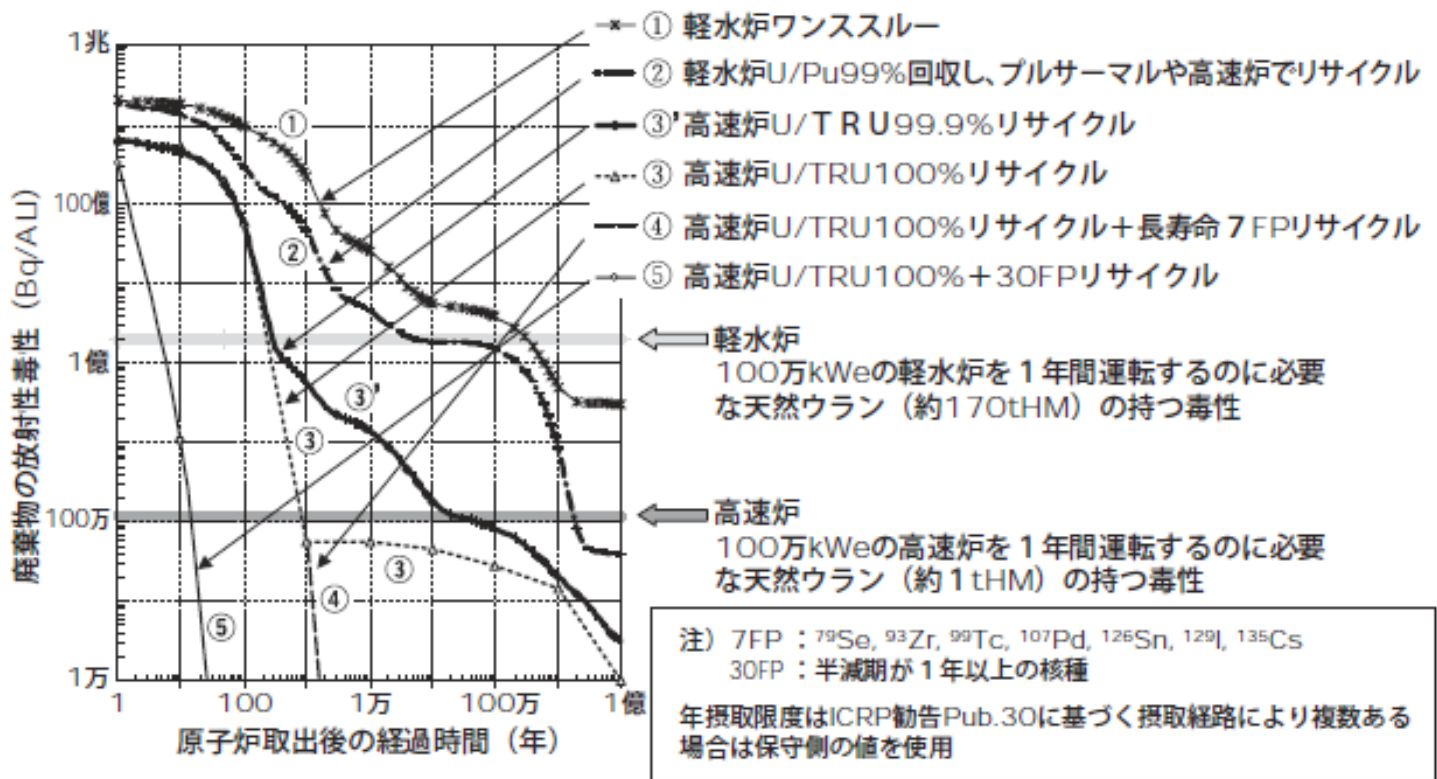


図8 放射性廃棄物の放射性毒性の経年変化

(参考：藤家洋一、「リサイクル文明が求める原子力—その全体像と長期展望」、日本電気協会新聞部(1998)、及びJNC TN1400 2002-001「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究(フェーズII) 2001年度成果報告書、核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電(株))