



Energia Nuclear

J.G. Marques

IST/ITN

Perspectivas Energéticas para o Século XXI

Instituto para a Investigação Interdisciplinar, 12 Junho 2013

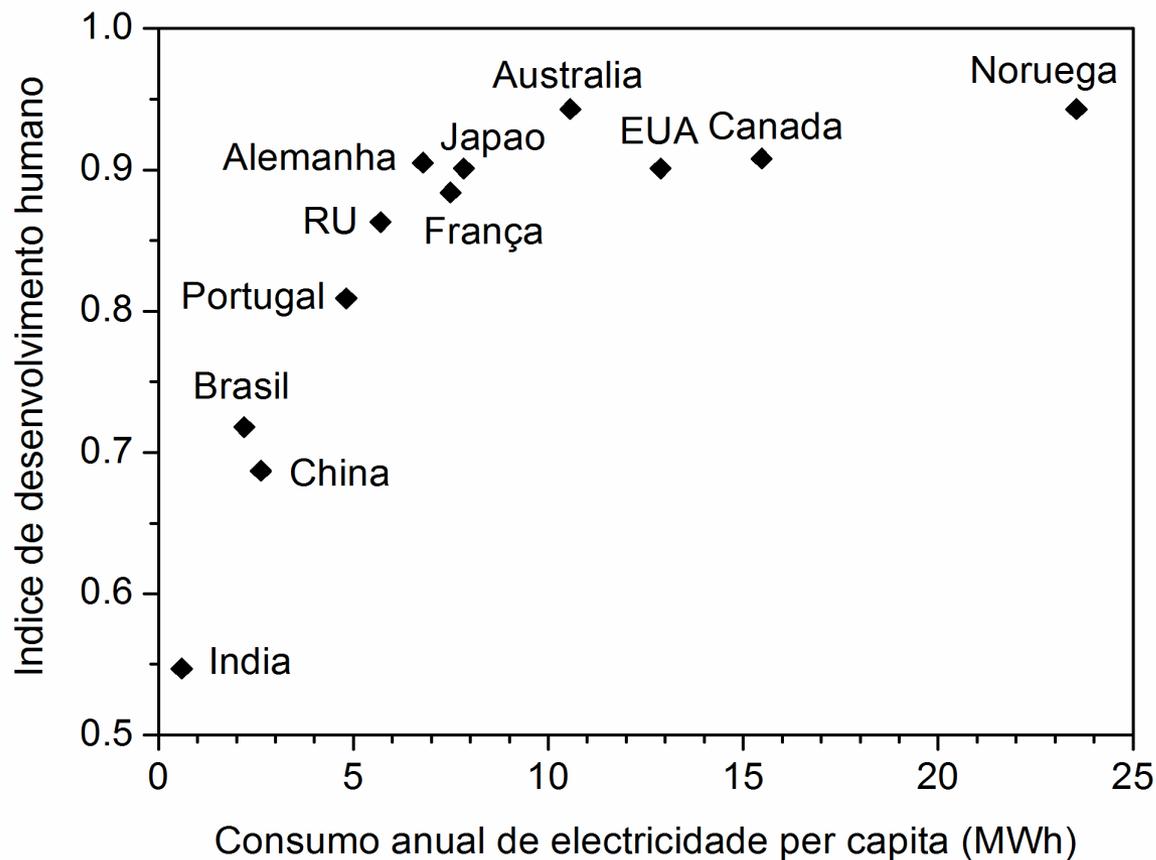
Sumário

- Introdução
- Recursos Naturais
- Resíduos Radioactivos
- Tecnologia dos Reactores de Cisão
- Conclusões

Introdução

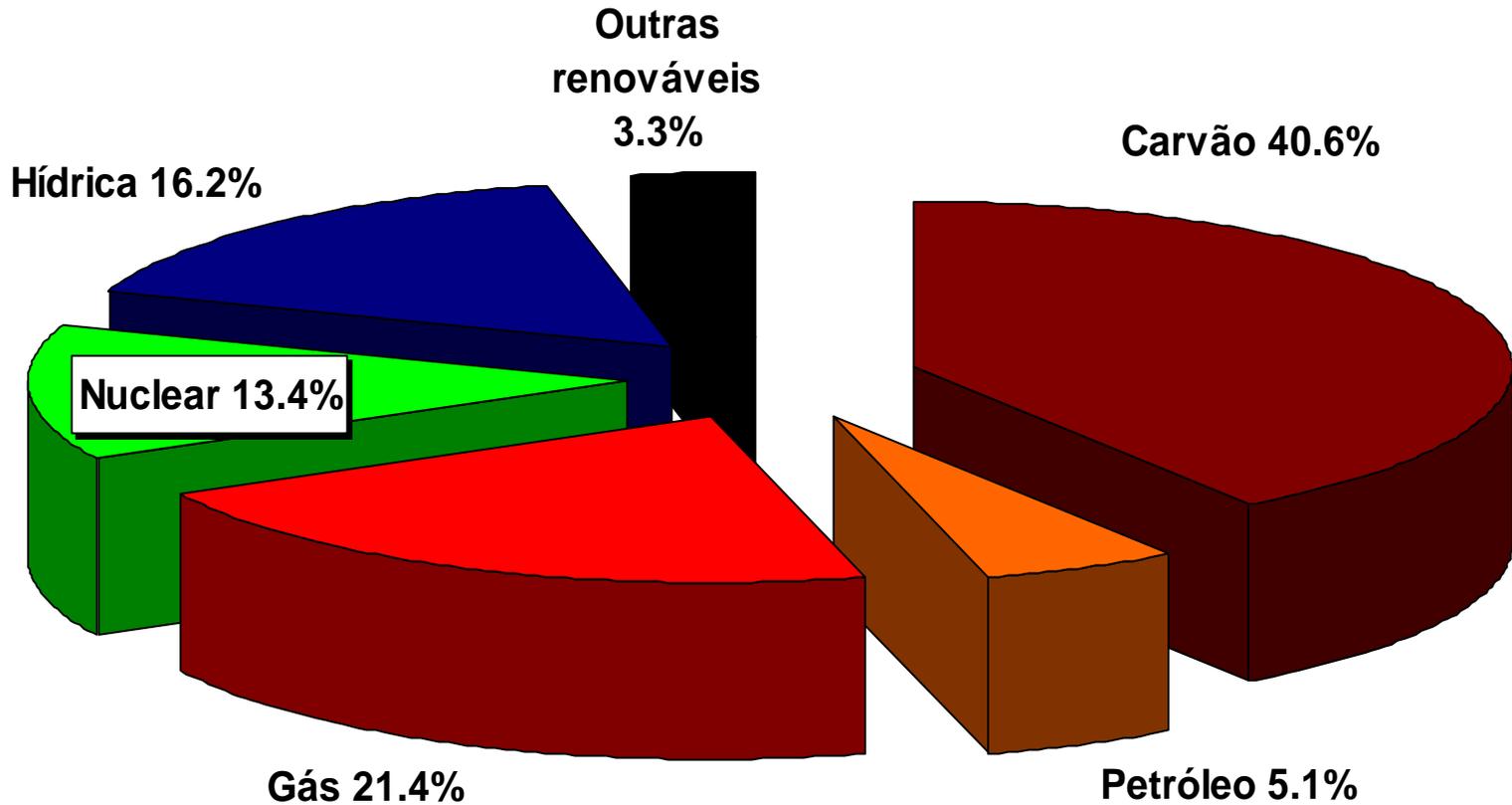
- Diversos estudos apontam sistematicamente para um aumento significativo das necessidades de energia a nível mundial.
- A Comissão Europeia estima que esta necessidade aumente para o dobro da actual em 2050, i.e., sete vezes mais do que o aumento da população.
- Ao mesmo tempo verificam-se como factores limitativos:
 - Reservas finitas de combustíveis fósseis;
 - Necessidade de redução de emissões de GEE.

Introdução



Relação ente índice de desenvolvimento humano e consumo anual de electricidade per capita.

Introdução

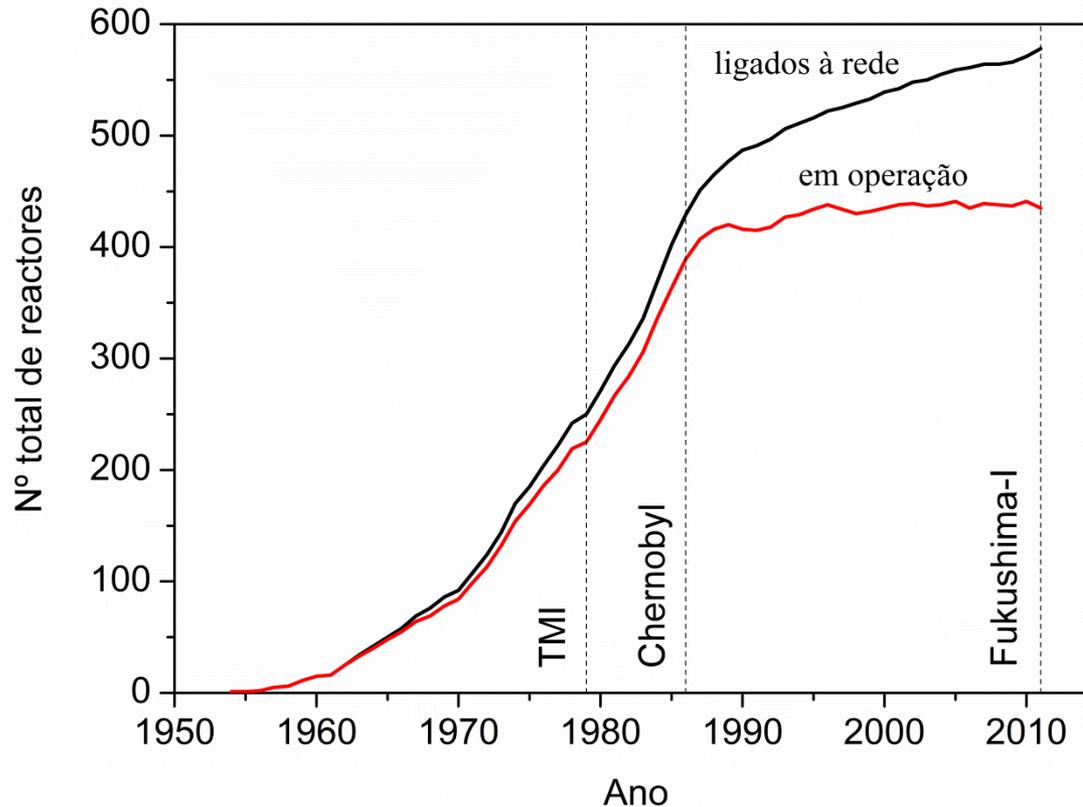


Geração de electricidade a nível Mundial
(OCDE, Key World Energy Statistics 2011).

Introdução

- Lewis Strauss, *Chairman da Atomic Energy Commission* dos EUA, disse num discurso em 1954: *Our children will enjoy in their homes electrical energy too cheap to meter.*
- Esta visão utópica pareceu poder tornar-se realidade na década de 70, depois do primeiro choque petrolífero, período em que se deu uma expansão significativa do uso da energia nuclear.
- Contudo, os acidentes de TMI (1977), Chernobyl (1986) e Fukushima (2011) têm conduzido a sucessivas mudanças de optimismo → pessimismo, apenas parcialmente reversíveis.

Introdução

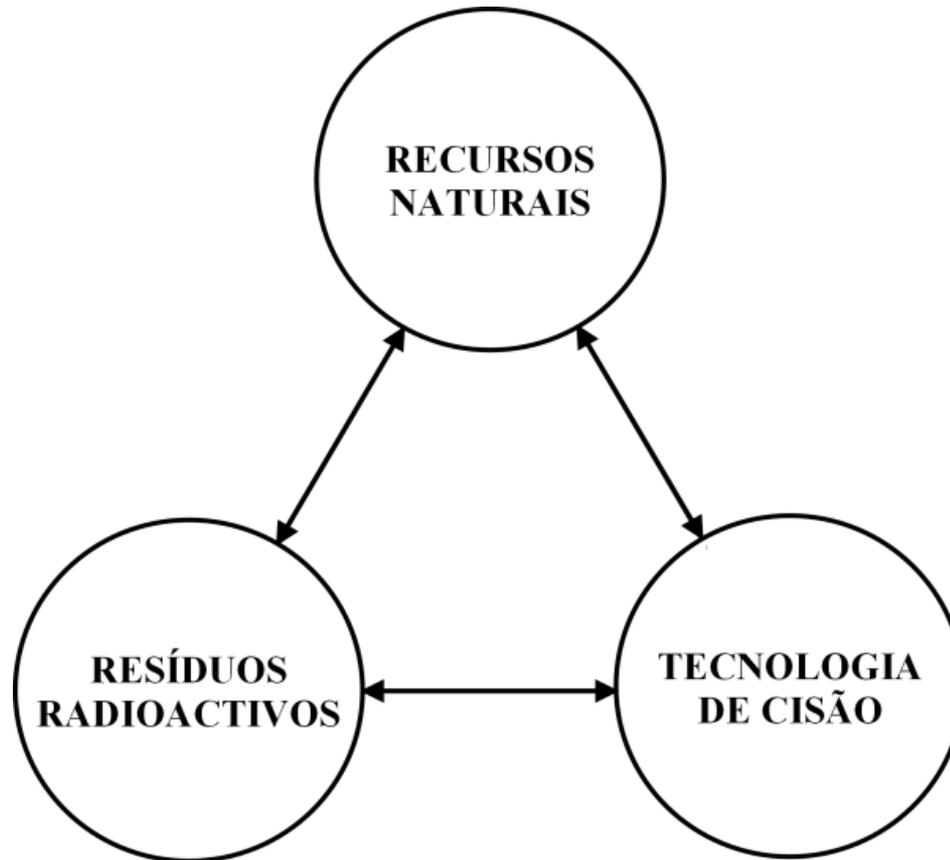


Evolução do número de reactores ligados à rede e em operação (PRIS database, IAEA).

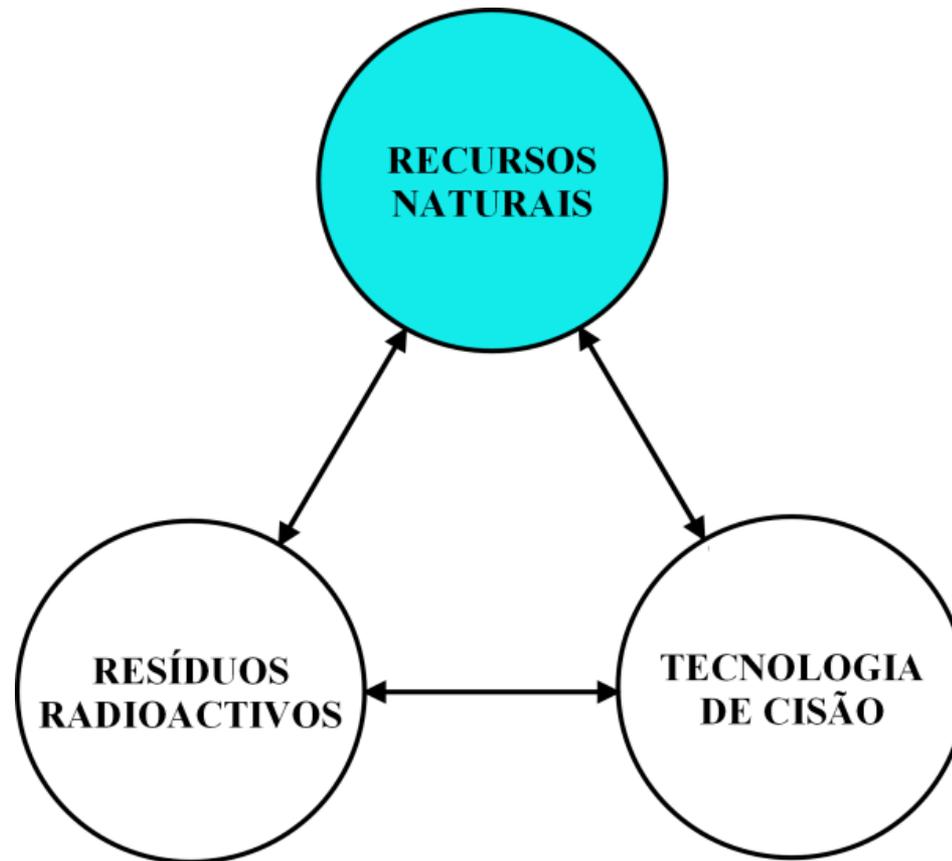
Introdução

- O ritmo de construção abrandou depois do acidente de TMI, apesar de terem sido terminados quase todos os reactores em construção.
- O acidente de Chernobyl actuou como um 2º travão, levando ao estabelecimento de políticas contra a energia nuclear.
- O número de reactores em operação tem-se mantido aprox. constante nos últimos 20 anos:
 - Novos reactores compensam (numericamente) saídas;
 - Construção sobretudo na Ásia;
 - A potência total instalada tem aumentado.

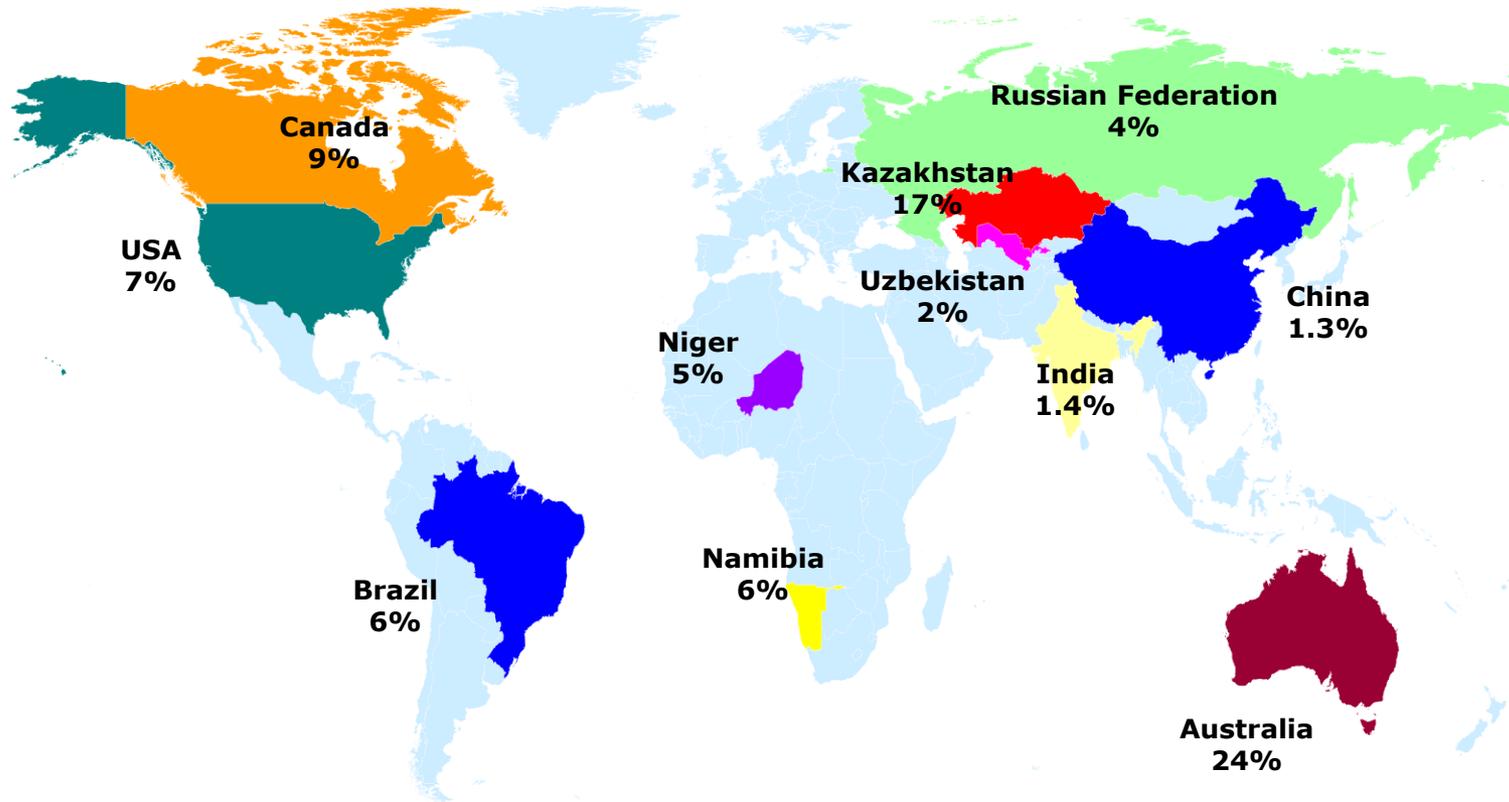
Introdução



Sucesso da energia nuclear de cisão dependente de três factores principais e da interligação destes.

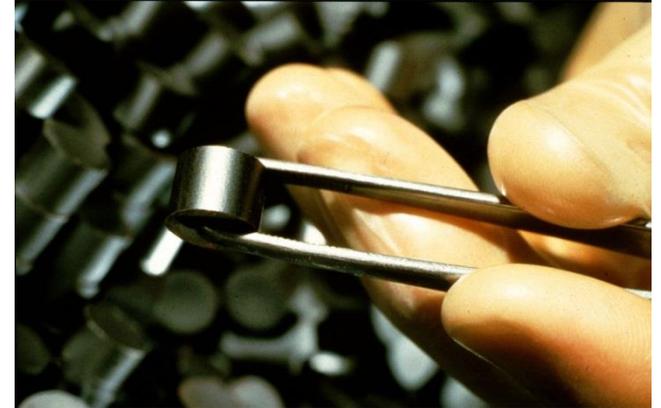
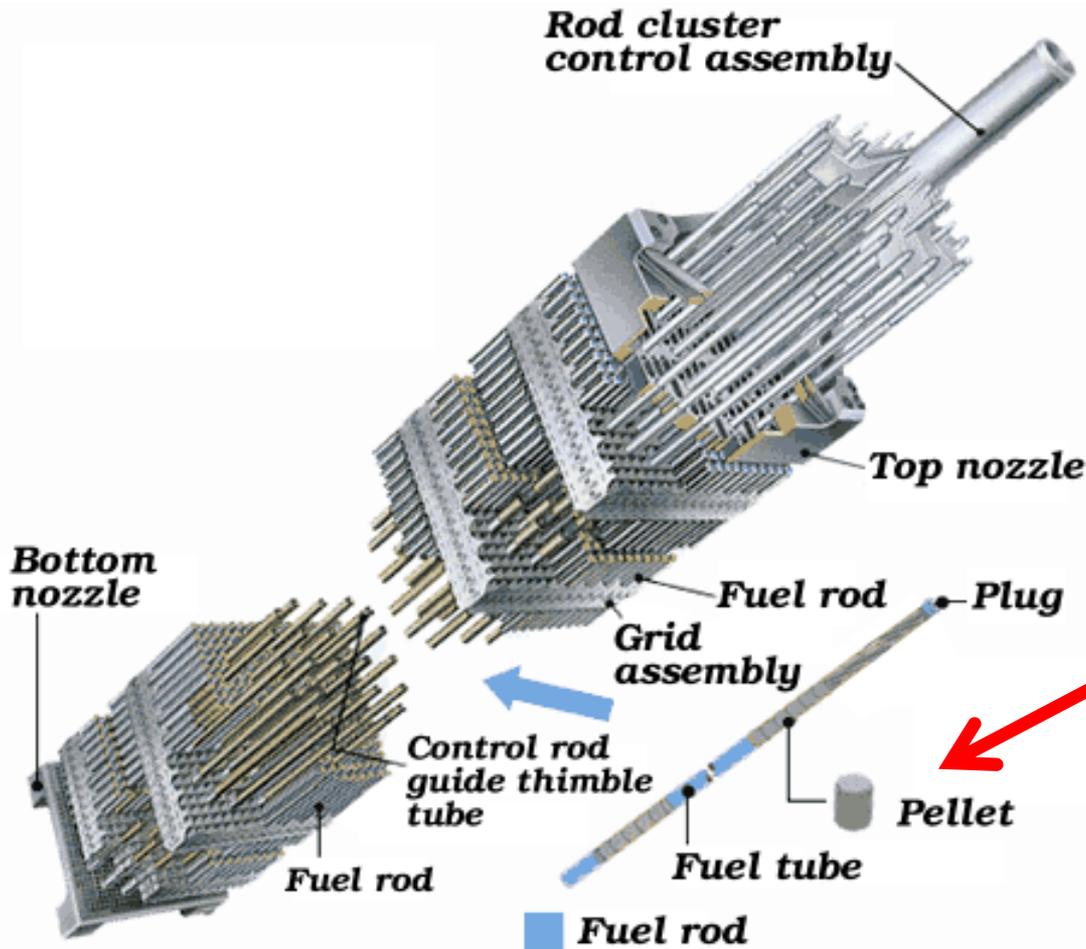


Recursos naturais



Distribuição geográfica dos principais recursos uraníferos identificados (NEA)

Recursos naturais



Elemento de combustível para reactor PWR. Cada vareta de liga de Zr contém ~300 pastilhas de UO_2 .

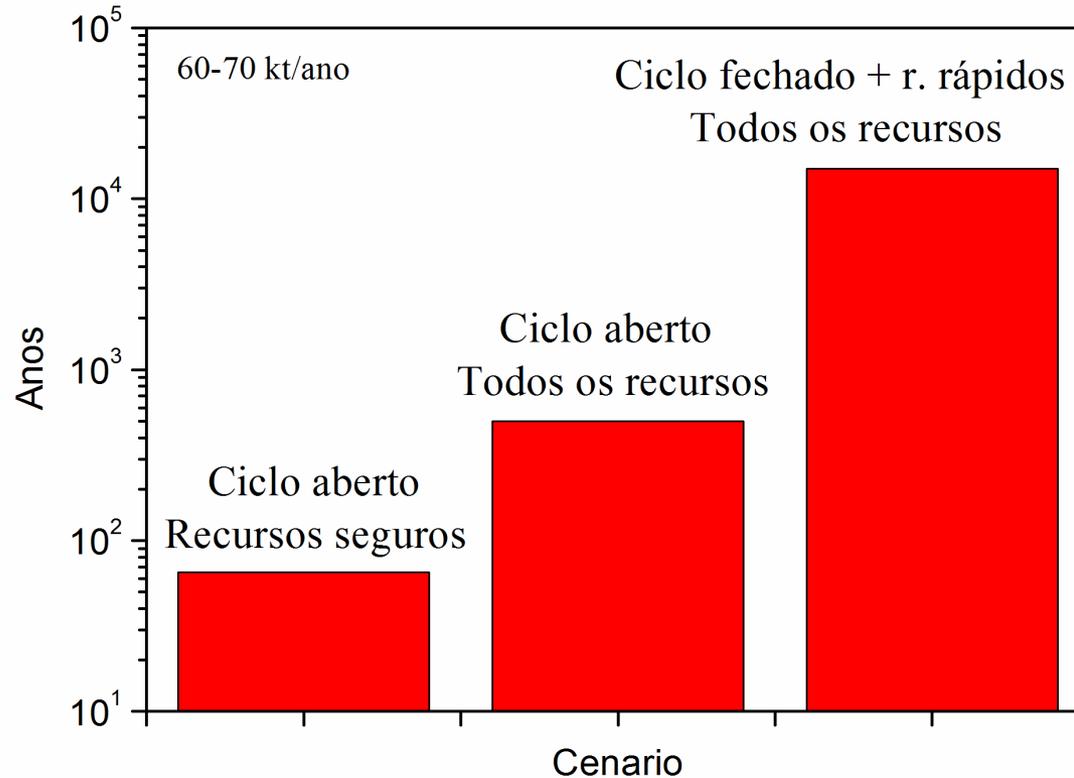
Recursos naturais

- Um reactor com 1 GWe requer aproximadamente 20 t de urânio enriquecido por ano.
- Para as produzir é necessário ~200 t de urânio natural, dadas as características do processo de enriquecimento.
 - Não é realista extrair todo o U-235 do urânio natural, pois é necessário realizar um trabalho de separação, o qual tem um custo (não-linear).
- Para comparação, uma central a carvão requer 4×10^6 t de carvão por ano.
 - Razão de $1:2 \times 10^4$, cerca de 100x inferior ao esperado se todo o urânio fosse usado.

Recursos naturais

- Recursos uraníferos seguros avaliados em 5.5 Mt, presumindo-se que existam mais 10.5 Mt.
- Adicionalmente, será possível recuperar 22 Mt urânio a partir de fosfatos (50-200 ppm de U).
- Consumo mundial tem sido de 60-70 kt por ano.
- Três cenários básicos, ao consumo actual:
 - Urânio para 70-80 anos (recursos seguros);
 - Urânio para 500 anos (todos os recursos);
 - Urânio para ~20 mil anos (ciclo fechado; forte utilização do U-238).

Recursos naturais

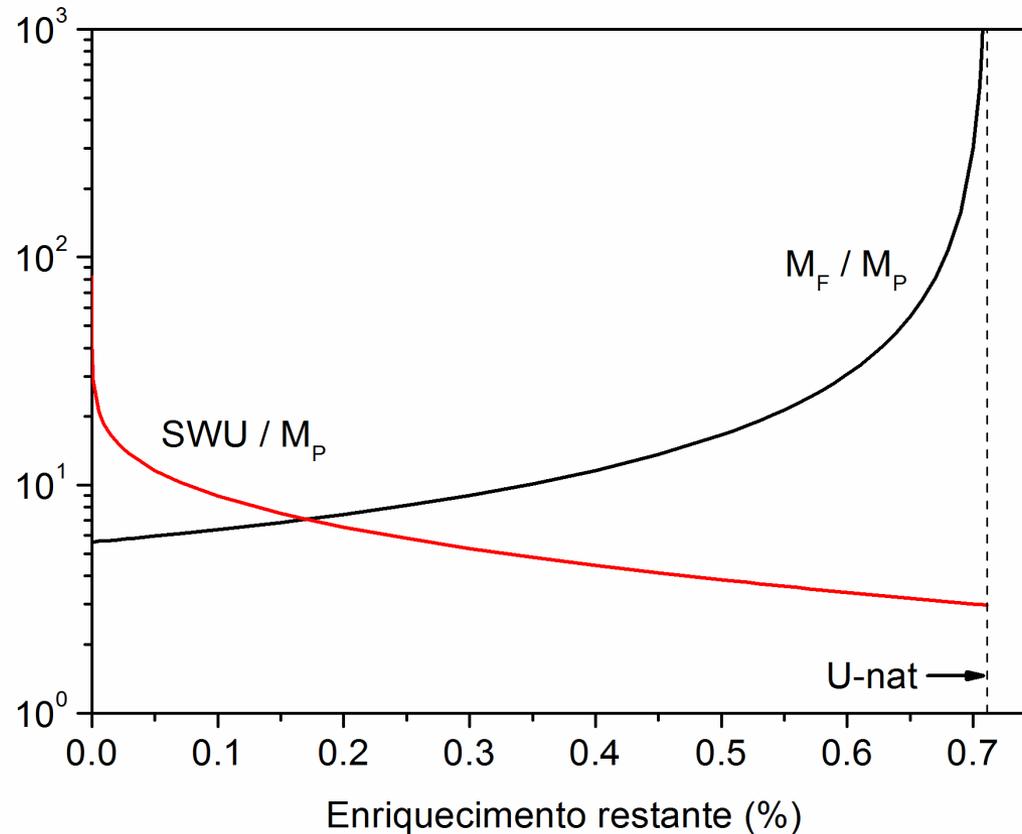


Duração previsível do urânio natural para três cenários de utilização.

Recursos naturais

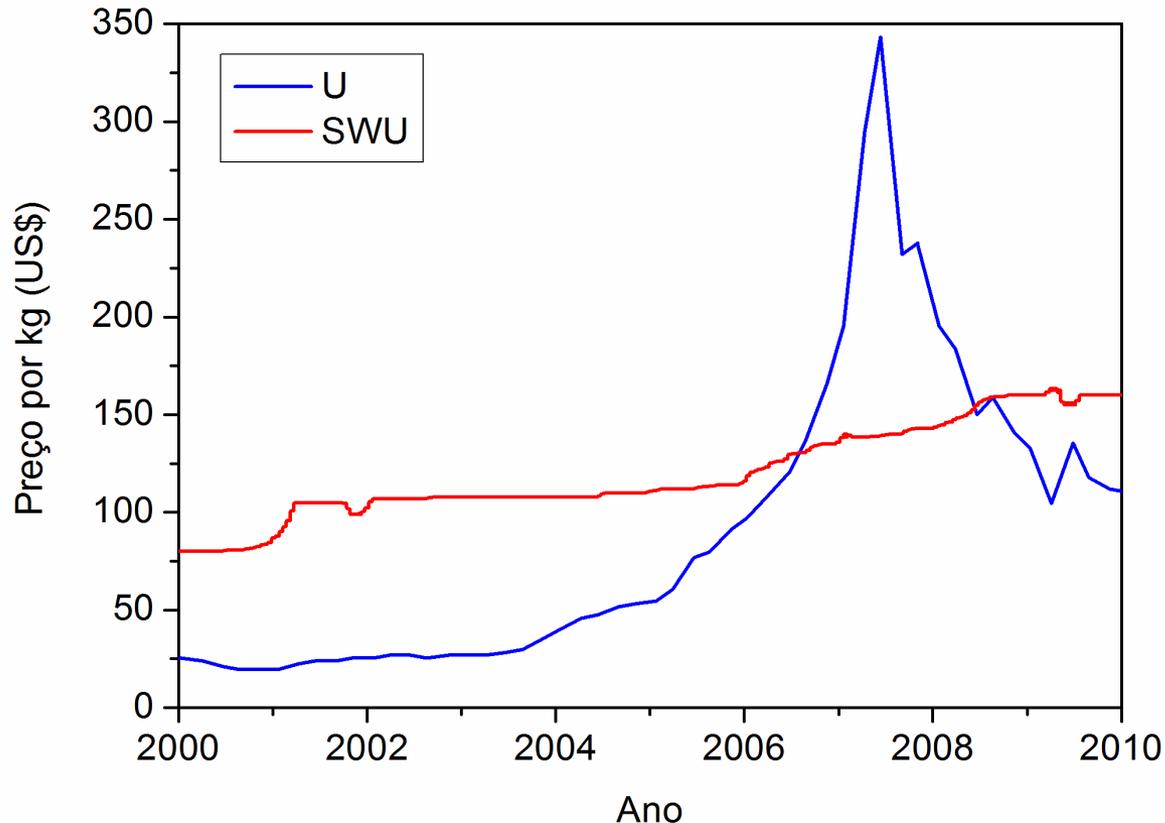
- Com os reactores actuais é possível utilizar menos urânio natural, se conseguirmos:
 - Realizar mais trabalho de separação durante o processo de enriquecimento;
 - Cindir uma quantidade maior de urânio nos elementos de combustível (maior queima);
 - Reciclar os elementos de combustível depois da sua primeira utilização.
- Estes três factores encontram limitações físicas, que passamos a analisar.

Recursos naturais



Varição do trabalho de separação (SWU) e da massa de urânio natural (M_F) para um enriquecimento de 4%.

Recursos naturais

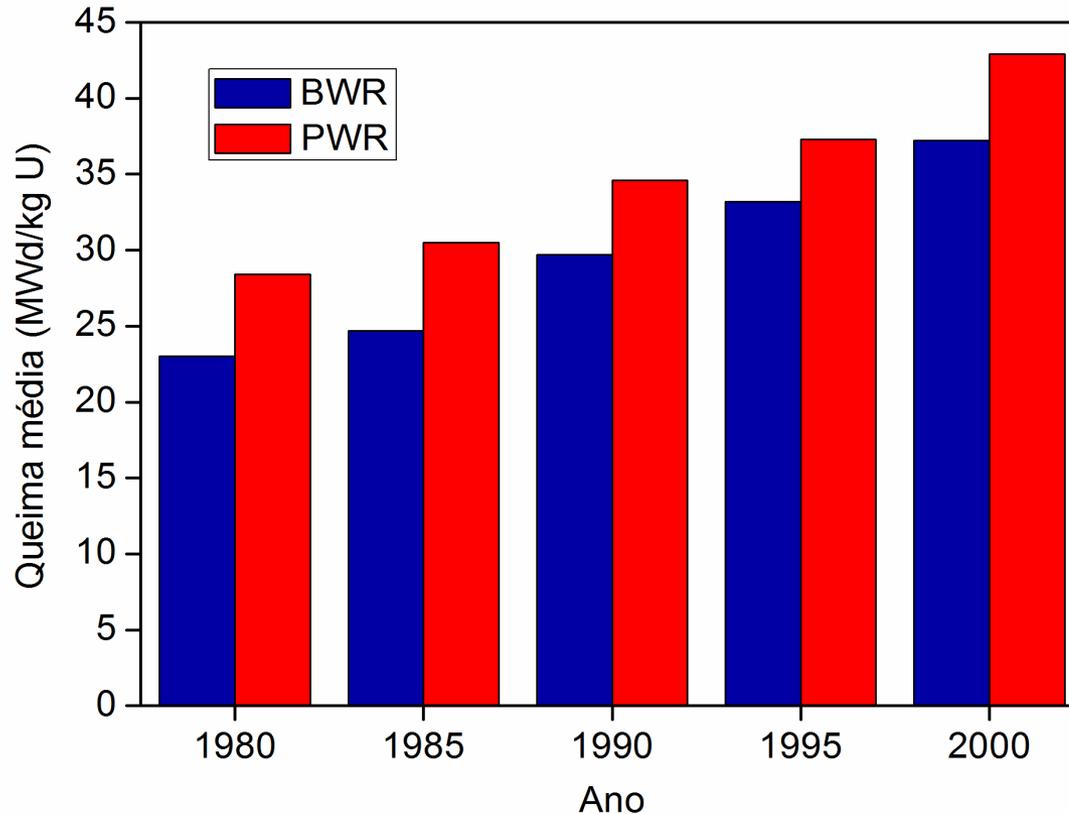


Variação dos custos do urânio e do trabalho de separação; este último tem aumentado apesar da transição generalizada de enriquecimento por difusão para centrifugação.

Recursos naturais

- Trabalho de separação pode ser aumentado para além do ponto óptimo (do ponto de vista económico) sem grande acréscimo de custo final.
 - Custo do combustível ~15% do kWh.
- Se aumentarmos o trabalho de separação em 50% pode poupar-se cerca de 20% do urânio necessário por reactor.
- Número limitado de instalações para enriquecimento de urânio.
 - Limitações associadas a não-proliferação de armas nucleares.

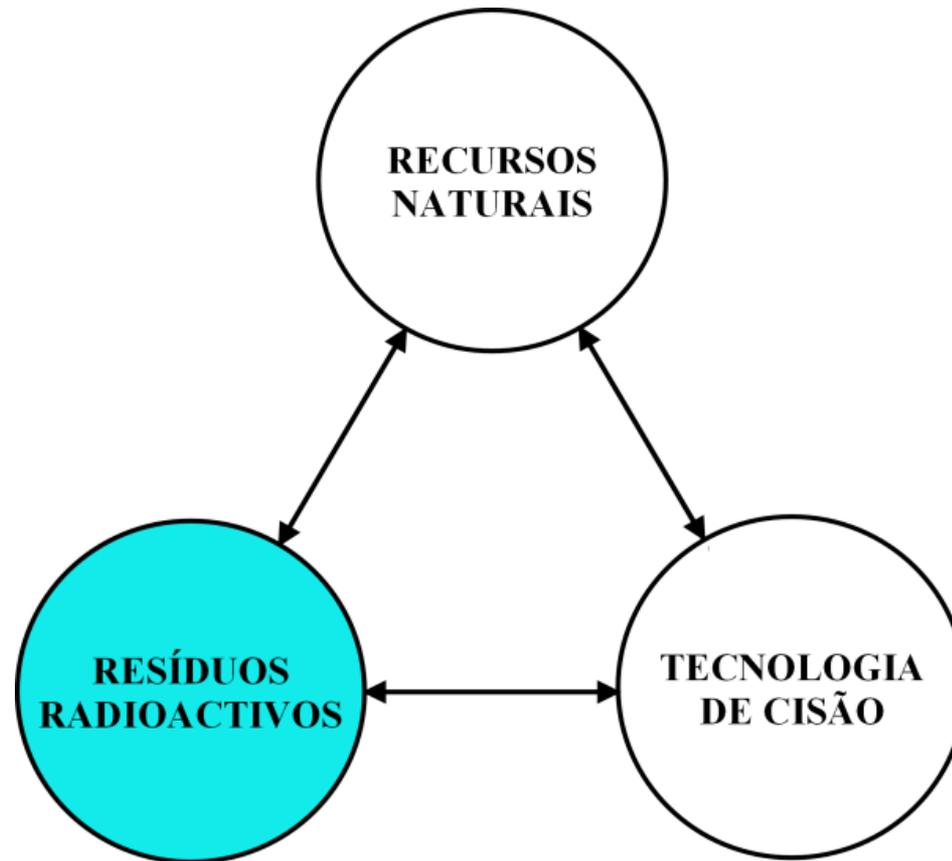
Recursos naturais



Evolução da taxa de queima em reactores BWR e PWR desde a década de 80. O aumento deve-se essencialmente a progressos no fabrico dos elementos de combustível.

Recursos naturais

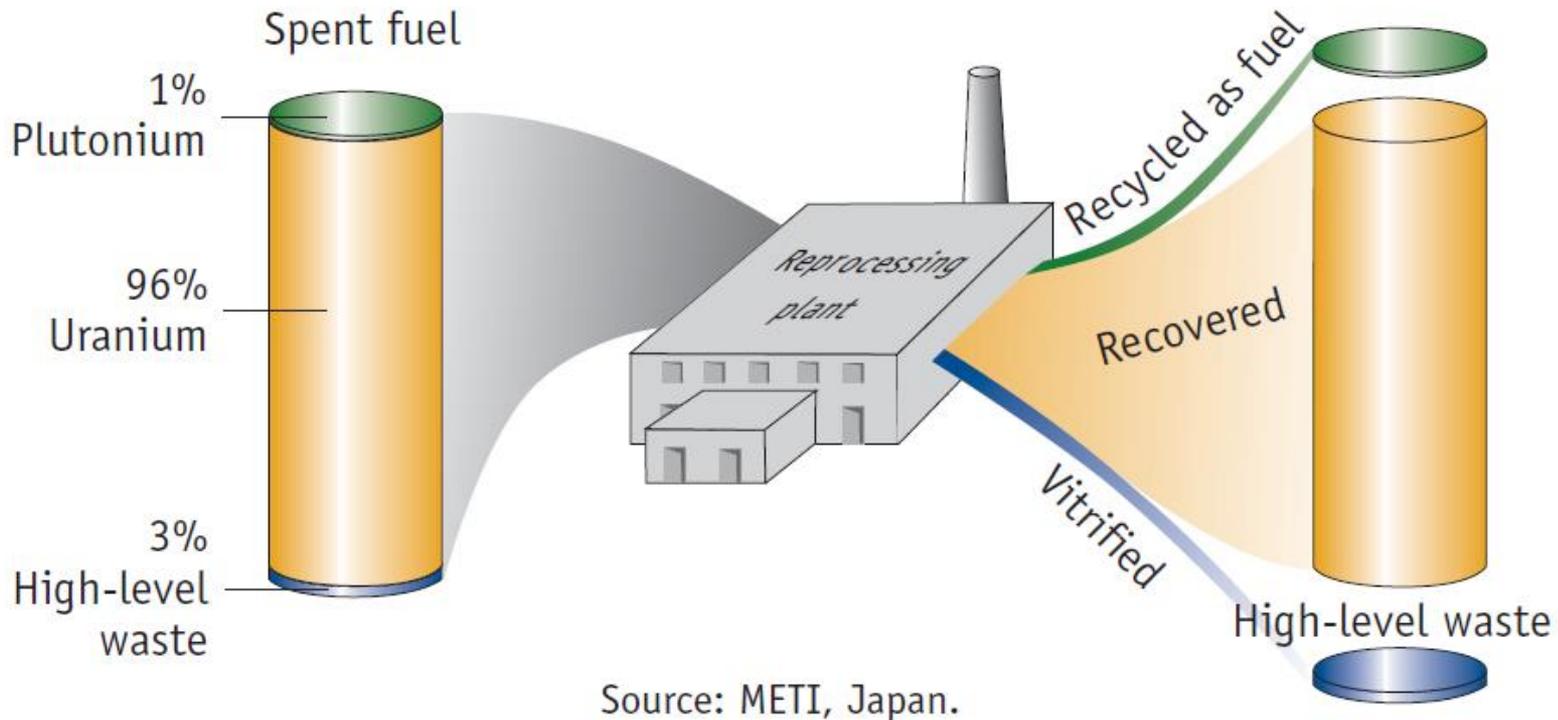
- Queima média de elementos de combustível pode aumentar 30-50%, até cerca de 60 GWd/tU.
- Limitação imposta por materiais:
 - Formação de zona na periferia do combustível com queima acentuada;
 - Corrosão da bainha do combustível.
- Limitação imposta por outros factores:
 - Necessário enriquecimento inicial superior a 5%;
 - Problemas de criticidade em toda a cadeia de produção de combustível e posterior armazenamento.



Resíduos radioactivos

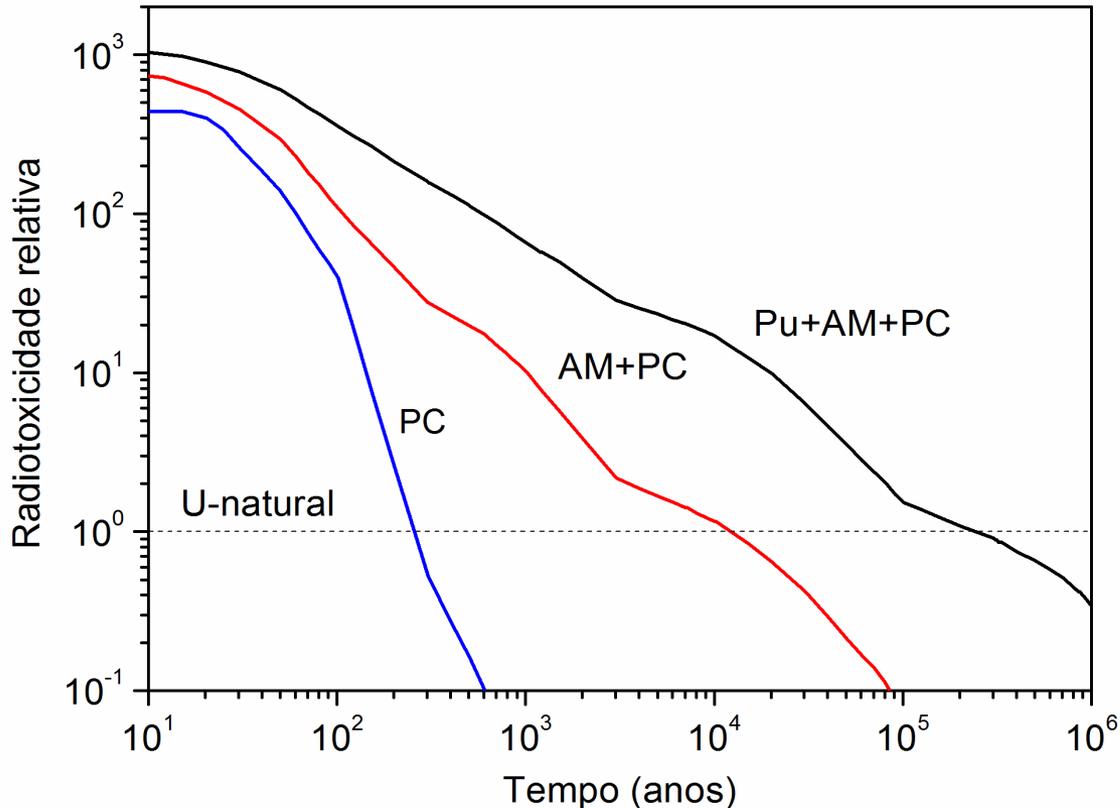
- Ao aumentar a queima média do combustível também se reduz na mesma proporção o volume de resíduos radioactivos (num ciclo aberto).
- Composição típica do combustível irradiado:
 - 96% de urânio;
 - 1% de plutónio;
 - 3% de produtos de cisão;
- Reciclagem:
 - Recuperar U e Pu para novo combustível;
 - Separar os produtos de cisão para vitrificação e armazenamento definitivo.

Resíduos radioativos



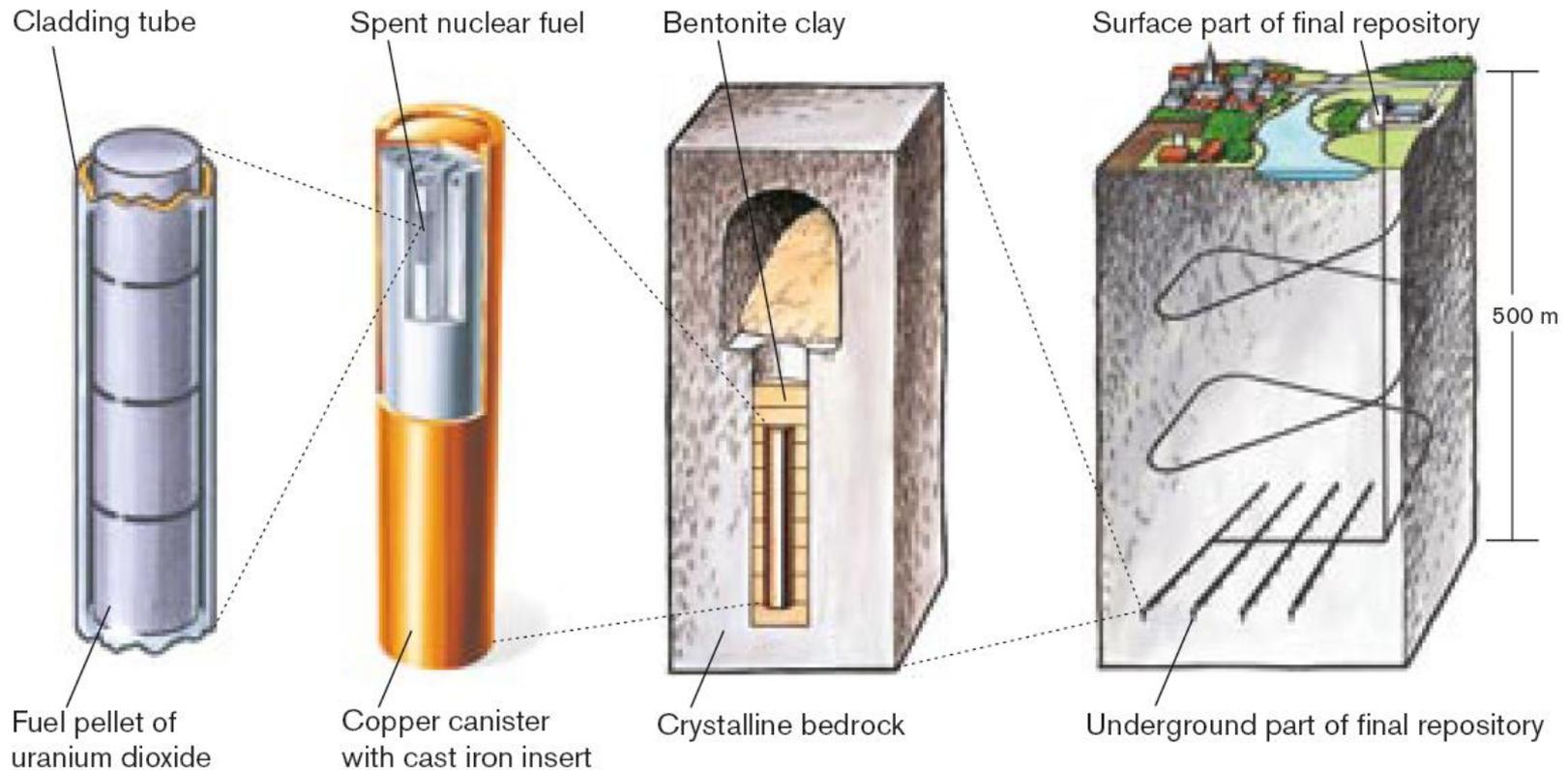
Composição típica do combustível após irradiação. Através do reprocessamento pode-se recuperar o U (enriquecimento médio de ~0.8%), o Pu (para combustível MOX) e separar os resíduos para armazenamento.

Resíduos radioativos



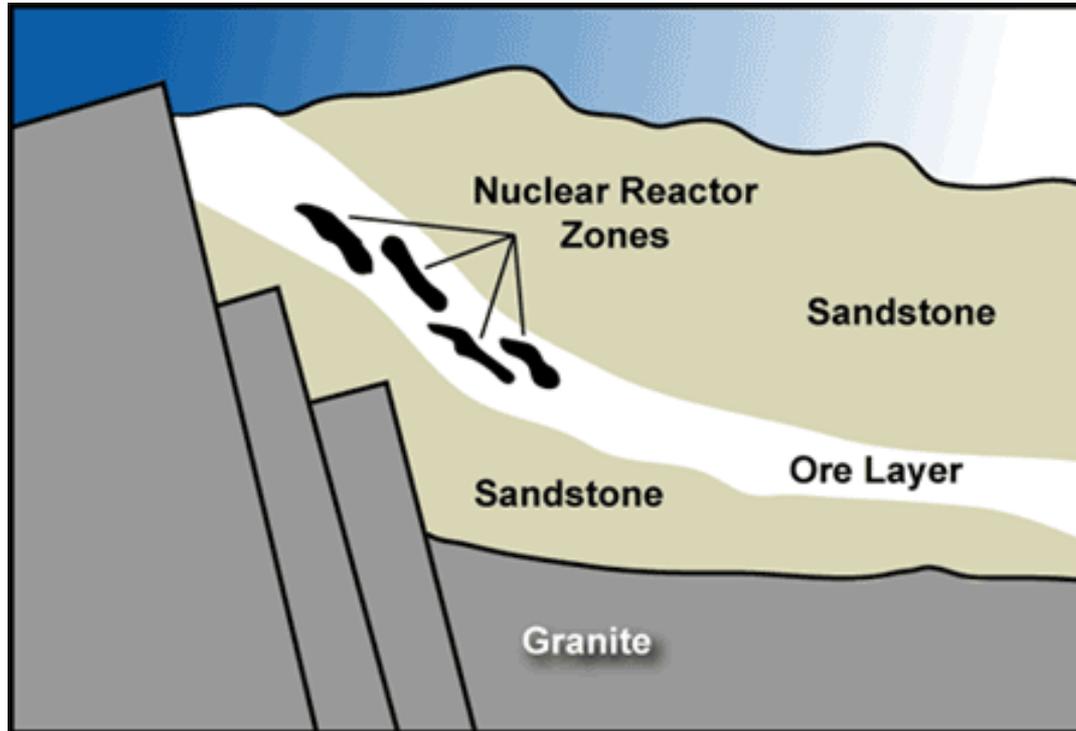
Radiotoxicidade relativa de três grupos de resíduos: produtos de cisão (PC); PC com actinídeos menores (AM); PC com AM mais plutônio. Separação reduz volume e tempo de armazenamento em depósito geológico.

Resíduos radioativos



Armazenamento geológico usa conceito de imposição de barreiras múltiplas de retenção.

Resíduos radioativos



Os resíduos produzidos nos reatores naturais de Oklo (5.4 t produtos cisão + 1.5 t Pu) mantiveram-se na zona circundante dos reatores. O Pu migrou menos de 3 m a partir das zonas em que foi formado.

Resíduos radioactivos

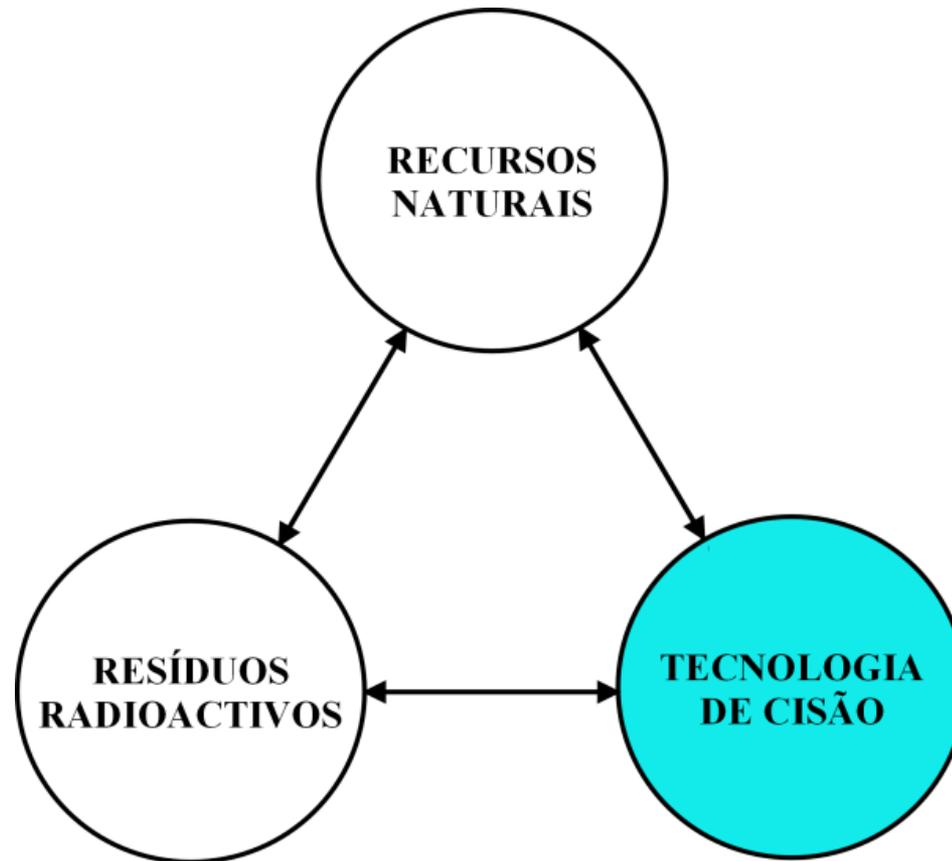
- Opinião pública sobre depósitos geológicos:
 - Problemática nos EUA (Yucca Mountain);
 - Recusa em Itália;
 - Aceitação na Suécia e Finlândia;
 - ...
- Volume dos resíduos deve ser reduzido:
 - Com ciclo aberto é necessário abrir um depósito com as características da Yucca Mountain, algures no Mundo, cada 3-4 anos, se a utilização de energia nuclear aumentar (estudo do MIT).
- Redução do tempo de armazenamento é desejável.

Resíduos radioactivos

- Para uma utilização mais racional dos depósitos geológicos é necessário:
 - Separar os produtos de cisão do Pu e dos MA.
 - Usar Pu em comb. MOX (“mix oxide”, $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$).
 - Cindir MA com neutrões rápidos.
 - Transmutar produtos de cisão com $T_{1/2}$ grande.
- Transmutação:
 - ^{99}Tc ($T_{1/2} = 213\,000$ a) transformado por captura neutrónica em ^{100}Tc ($T_{1/2} = 15.8$ s), que decai para ^{100}Ru , estável.
 - ^{129}I ($T_{1/2} = 16 \times 10^6$ a) transformado em ^{130}I ($T_{1/2} = 12.4$ h), que decai para ^{130}Xe , estável.

Resíduos radioactivos

- Cisão dos MA requer neutrões rápidos:
 - Cisão só ocorre com neutrões rápidos (tem limiar).
 - Com neutrões térmicos só são transformados em outros elementos transurânicos, por activação.
- Reactores a neutrões rápidos:
 - Mais complicados de construir e operar.
 - Quantidade de MA no combustível inferior a 5%.
- “Acceleration Driven Systems” juntam acelerador e reactor. O acelerador fornece neutrões extra por reacções de espalação num alvo apropriado.
 - Permite ter quantidades maiores de MA.



Tecnologia de cisão

Geração I



Protótipos

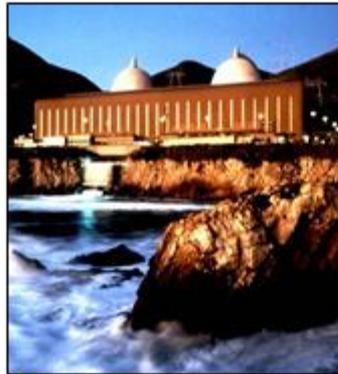


- Shippingport
- Dresden
- Fermi I
- Magnox

Geração II



Reactores comerciais



- PWR, BWR
- CANDU
- VVER
- RBMK

Geração III



Reactores avançados



- ABWR
- AP600
- AES-92
- EC6

Geração III+



- AP1000
- EPR
- ESBWR
- SWR 1000
- ACR 1000

Geração IV



- Económicos
- Com segurança melhorada
- Minimizam resíduos
- Resistentes à proliferação

Geração I

Geração II

Geração III

Geração III+

Geração IV

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030



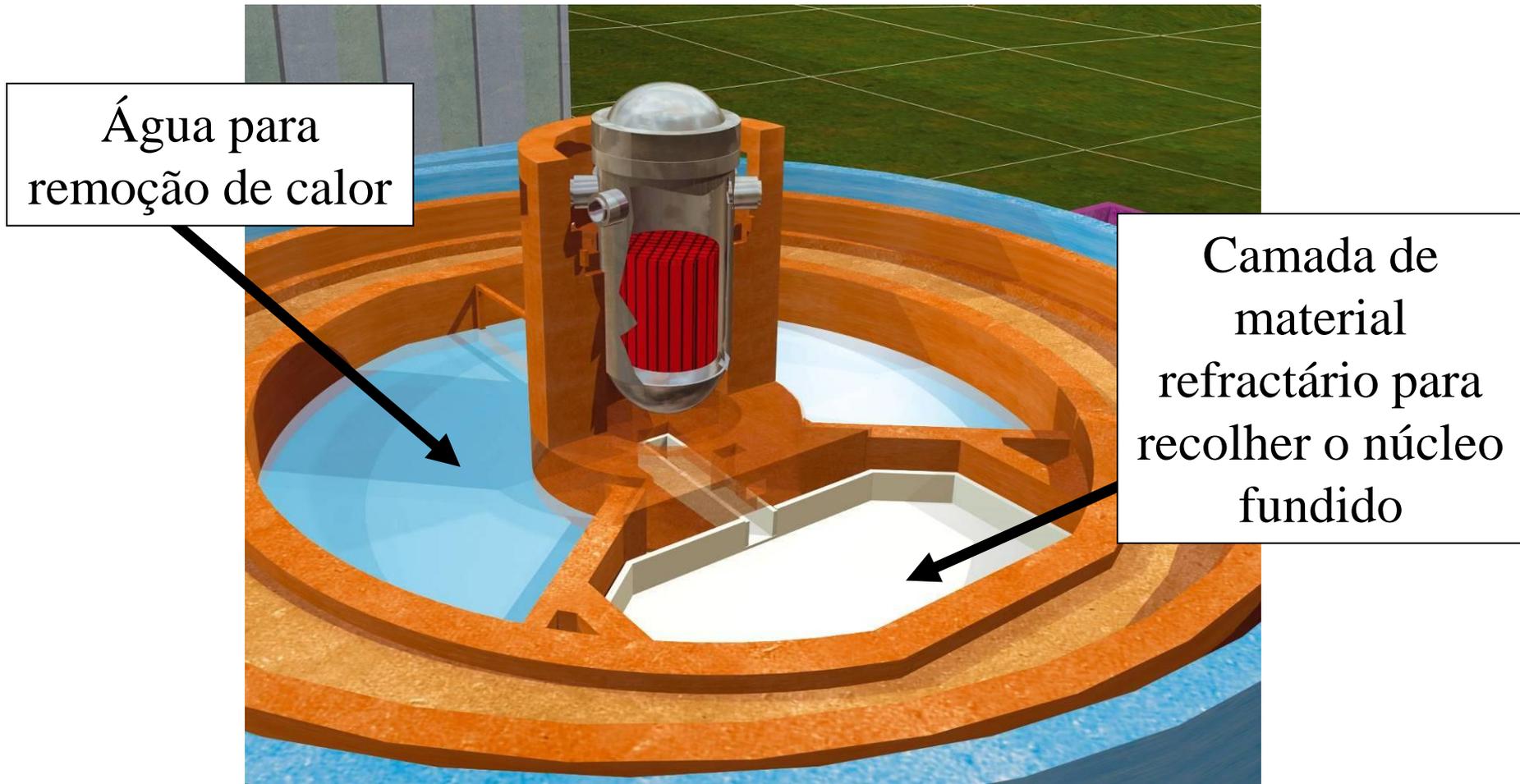
Tecnologia de cisão

- Tecnologia de cisão fortemente marcada por opções tomadas nas décadas de 1940 e 1950:
 - Programa de propulsão naval;
 - Reactores compactos, moderados e arrefecidos a água.
- Vantagens dos reactores da 3^a Geração:
 - Design simplificado e mais robusto;
 - Maior uso de mecanismos de segurança passiva;
 - Redução da probabilidade de fusão do núcleo;
 - Medidas de mitigação em caso de fusão, para reduzir o impacto dos acidentes.

Tecnologia de cisão

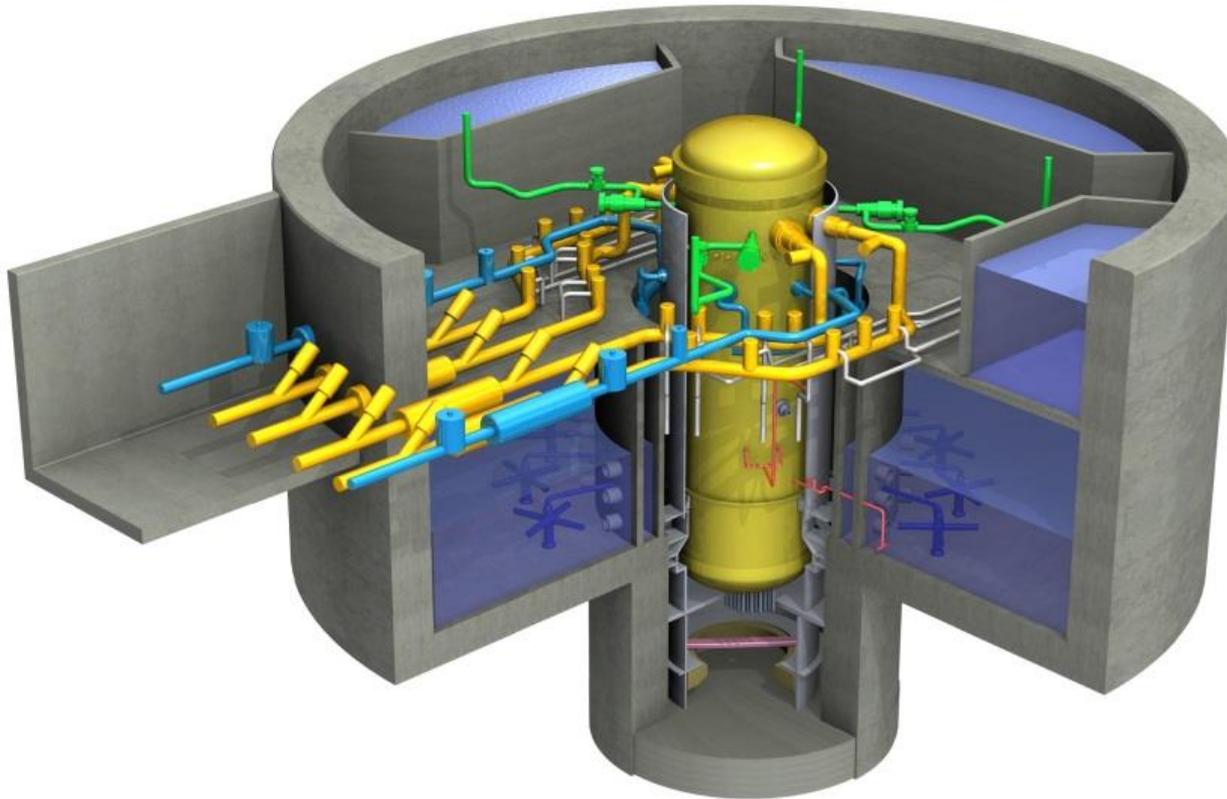
- O “European Pressurised Reactor” (EPR) reflecte uma nova filosofia: *no need for emergency evacuation outside the immediate vicinity of the plant, only limited sheltering, and no long-term restrictions in the consumption of food.*
- É o primeiro reactor a incluir medidas para manter no edifício do reactor o material resultante da fusão do núcleo (“corium”, mistura de urânio com outros materiais).
- Esta solução começou a ser adoptada em muitos dos reactores da 3ª Geração.

Tecnologia de cisão



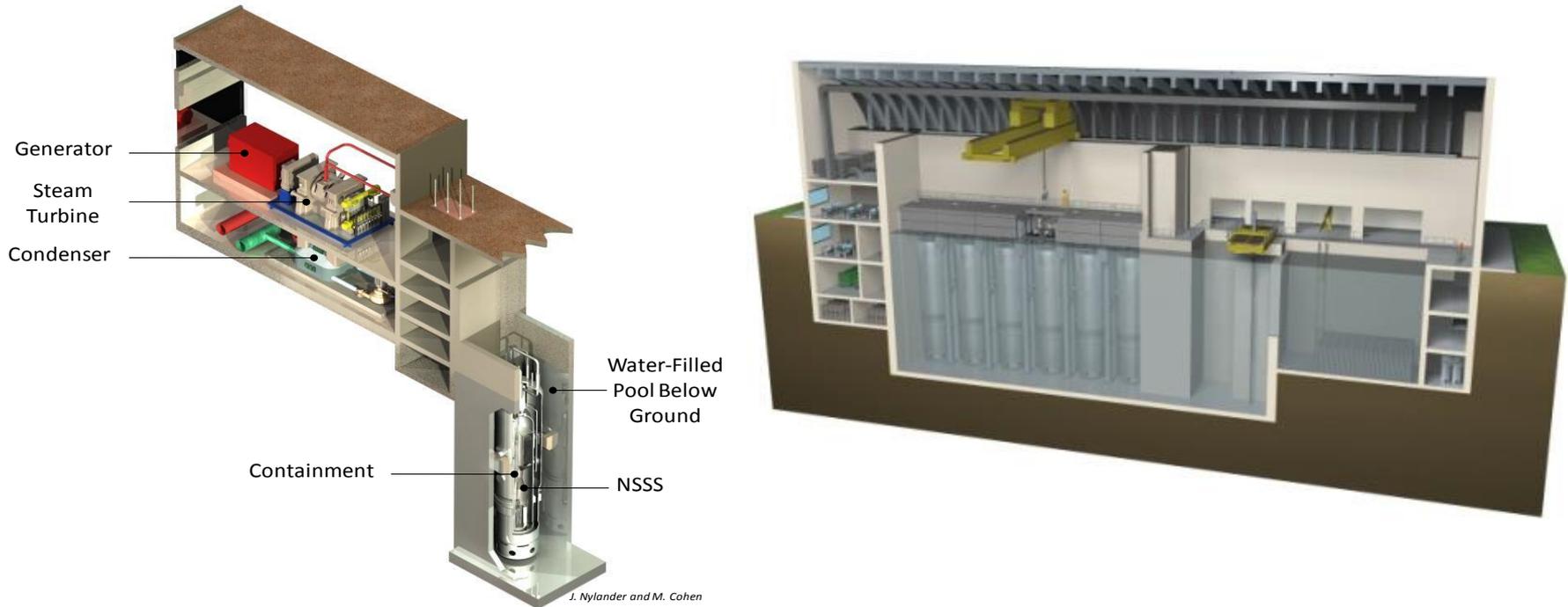
“Core catcher” do EPR.

Tecnologia de cisão



Reactor a água ebuliente da 3ª Geração (ESBWR) com depósitos múltiplos de água para manter o núcleo sempre coberto, sem necessidade de mecanismos activos.

Tecnologia de cisão



Reactor modular (NuScale, 160 MW, 45 MWe); cada módulo tem turbina/gerador, podendo juntar-se o número de módulos necessário para a potência requerida.

Conclusões

- Reactores de cisão baseados em tecnologia madura, com recursos naturais suficientes.
- Diversas soluções tecnológicas disponíveis, com claras vantagens relativamente às soluções de há 2-3 décadas.
- Com a actual frota de reactores:
 - Possível aumentar queima do combustível;
 - Possível diminuir o consumo de urânio natural;
 - Reciclagem tem impacto sobretudo no armazenamento definitivo dos resíduos.

Conclusões

- Reactores da 4^a geração:
 - Utilização em larga escala do urânio;
 - Possível aumentar o n^o de reactores de cisão.
- O nosso caminho:
 - Substituir reactores antigos por reactores de 3^a Geração;
 - Investir em novas soluções para tratamento de resíduos radioactivos;
 - Completar o desenvolvimento de reactores de 4^a Geração (e de reactores de fusão) para enfrentar os desafios do século XXI.