

VYUŽITÍ URYCHLOVAČŮ

Přehled urychlovačů

Kategorie	Počet
E > 1 GeV	112
Radioterapie	> 4000
Výzkum (včetně biomedicínského)	800
Výroba radioizotopů pro lékařství	200
Průmysl	1500
Implantace iontů	2000
Modifikace povrchů	1000
Zdroje synchrotronového záření	50
Celkem (1994)	10000

Table 1: Přehled využití urychlovačů ve světě (Dearneley 1987)

Výzkum

- fyzika – mnoho oblastí, včetně astrofyziky
- chemie
- biologie

Průmysl

- iontové implantace
- modifikace povrchů
- mikrolitografie
- synchrotronové záření
- sterilizace
- polymerizace
- aktivace (detekce výbušnin)

Lékařství

- produkce izotopů
- terapie pomocí gama záření, nebo těžších částic

Energetika

- fúze
- zážeh plazmatu
- transmutace odpadu
- iniciace štěpení

Aplikace ve výzkumu

Fyzika elementárních částic

- objevy nových částic (antiproton, J/Ψ , dva typy neutrin, W,Z, počet neutrin)
 - nové procesy (neutrální proudy)
- v období 30 let se změnila škála z 10^{-15} na 10^{-18} m

Jaderná fyzika

- struktura jader, vzbuzené stavy, spektroskopie
 - superdeformovaná jádra,
 - jádra mimo linii stability (Isolde - CERN, GANIL)
- těžké ionty – srážky jádro-jádro, fragmentace, QGP

Kosmologie a astrofyzika

- doplňují teleskopy
- cesta proti času ($100 \text{ GeV} \sim 10^{-10} \text{ s}$)
- měření astrofyzikálních reakcí (VdG v Řeži a na MFF)

Atomová fyzika

- studium komplexních mnohočásticových systémů
- ionizační ztráty při průchodu prostředím

Fyzika pevných látek a materiálová věda

- RTG záření (konvenční zdroje --> synchrotronové záření (SR))
- neutrony (reaktory --> „spallation“ zdroje)
- iontové svazky
→ samostatná stránka

Chemie a biologie

- radiační chemie (elektronový svazek, katalýza reakcí)
- studium chemických stavů pomocí SR
- radiační biologie (studium radiačních poškození tkání, terapie nádorů)
- studium struktury bílkovin, virů, atd. pomocí SR

Materiálová analýza – synchrotronové záření

Produkce:

3 generace zdrojů:

1. urychlovače pro JF a HEP - elektronové synchrotrony
storage rings
2. storage rings vybudované speciálně pro produkci SR
3. vysoce kvalitní zdroje využívající zařízení vložených do svazku:
undulators, wigglers

Parametry:

Tok

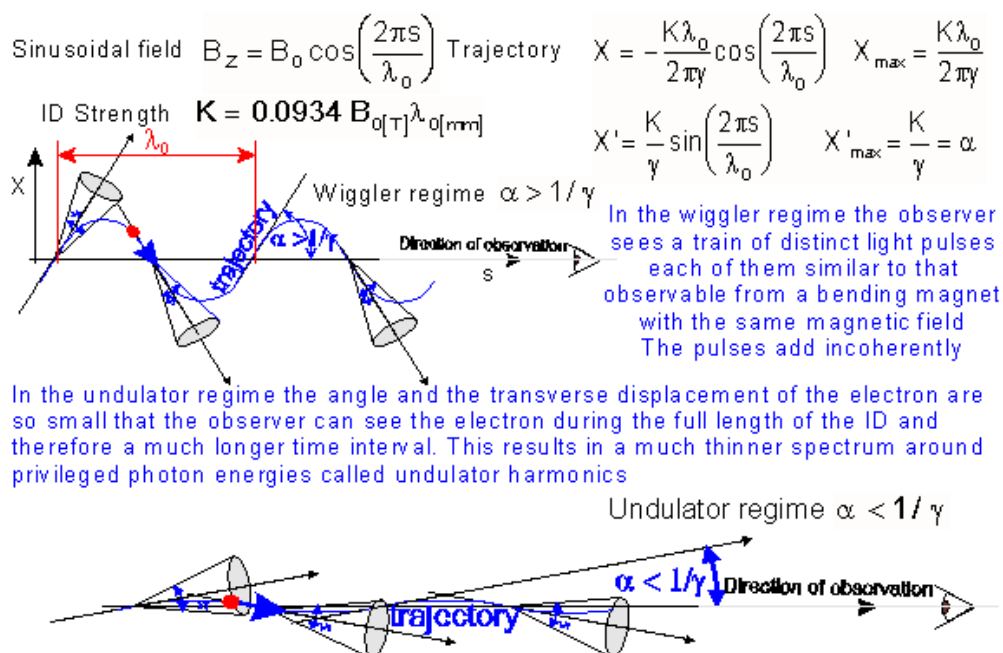
Brilliance: hustota celkového toku na počátku fázového prostoru

$$B = \frac{d^4 F}{dx dz d\theta d} \Big|_0$$

Undulátory, wigglery

- magnety se sinusoidálním průběhem pole
- intenzivní vyzařování SR
- lze ladit frekvenční spektrum změnou vzdálenosti

More flux, more collimation in angle and energy



J. LLA CLARE, SOLEIL Project team, Séminaire Rhodanien, March 1999, Production of Synchrotron Radiation, The Sources

Vlastnosti

široký spektrální rozsah (IR–RTG)
polarizace
pulsní svazek (100 ps)
koherence

Aplikace

Zobrazování na buněčné úrovni

- bílkovinná krystalografie: na rozdíl od DNK a RNK zde je důležité nejen pořadí, ale i geometrie molekul
- časový vývoj (pulsní svazek)

Materiálová analýza

studium nanostruktur: tenké magnetické vrstvy (počítačové disky)

Lékařské využití

Zobrazovací metody (tomografie, angiografie, radioterapie)
RTG mikroskopie

Materiálová analýza

Table 1
Methods and limits of material analysis

ACRONYM	TITLE	APPLICATIONS
RBS	Rutherford Back Scattering	Element profiling, determination of quantities, level 10^{-3} at. %
ERDA	Elastic-Recoil Detection Analysis	Determination of quantities, H - profiling, level 10^{-3} at. %
NRA	Nuclear-Reaction Analysis (prompt)	Profiling, quantities, level $10^{-4} - 10^{-5}$ at. %
NRRA	Nuclear-Resonance Reaction Analysis	Profiling, quantities, level 10^{-3} at. %
CPAA	Charged-Particle Activation Analysis	Quantities (bulk), level $10^{-6} - 10^{-7}$ at. %
NAA	Neutron-Activation Analysis	Quantities level 10^{-9} at. %
PIXE	Particle-Induced X-Ray Emission	Quantities

Lékařství

Produkce izotopů

- diagnostika
- terapie
- použití jaderných reakcí
- aktivita:

$$D = IN \sigma (1 - e^{-\lambda t})$$

- I intenzita svazku
- N počet atomů v terčíku
- σ účinný průřez
- λ rozpadová konstanta
- t doba ozařování

Typické produkované izotopy:

- Ga67, Br77, Ru81, In111, I123, Th201, F18

Lékařství – terapie

Hlavní důvody pro terapii těžkými částicemi:

- větší selektivita (zacílení do poškozené tkáně)
- vyšší biologické účinky

Fyzikální selektivita:

Protony, piony:

- předaná dávka má ostré maximum na konci dráhy – Braggův pík
- rozmytí doletu je velmi malé
- dráha je přímá

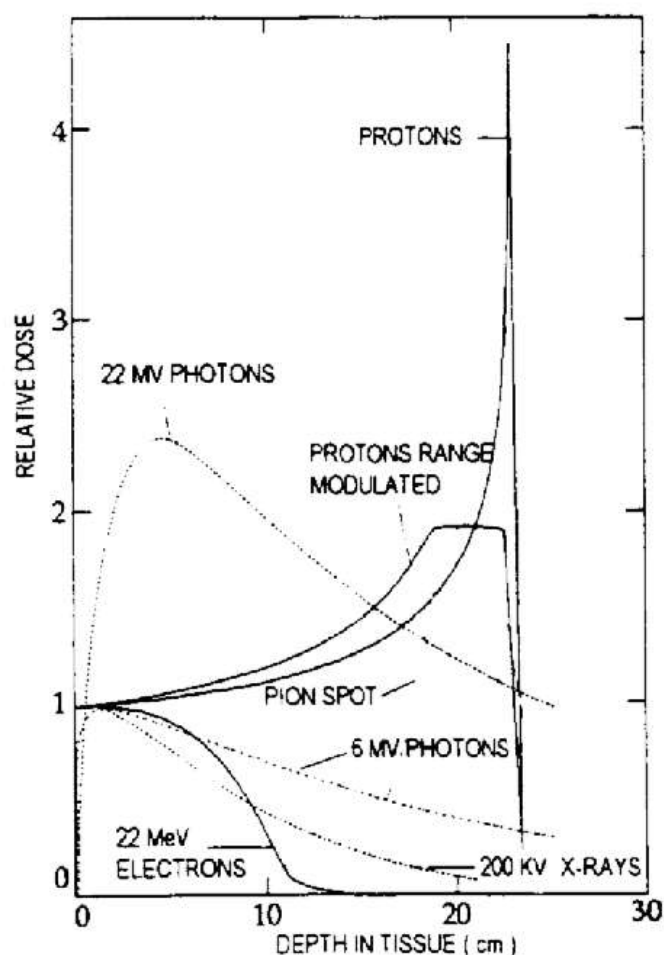


Fig. 1 Depth-dose distribution for various types of radiation

Biologické účinky

LET: linear energy transfer - hustota ionizace
koncentrovanější lokální poškození buněk

Rozdíly mezi účinkem částic s vysokým LET oproti nízkým LET:

- snížení rozdílu v radiosenzitivitě pro různé typy buněk
- snížení rozdílu v radiosenzitivitě pro různé fáze buněčného života (mitóza)
- menší efekt opravy buňky

Tj. homogennější odezva buněk na ozáření

Lékařské požadavky na zařízení

- spolehlivý urychlovač, snadno ovladatelný
- různé směry svazku: nejlépe „rotating gantry“
- dolet částic v tkáni: 3-25 cm ($E \sim 100-500$ MeV)
- maximální dávka v nádoru 5 Gray/min
- maximální ozařovaná oblast 30x30 cm²

Využití

do roku 1995 bylo protony ošetřeno 20 000 pacientů

PSI, Villigen

KVI Nijmegen

SÚJV Dubna

Projekty: TERA (Itálie), PRAMES (Praha)

Výhody oproti konvenční léčbě

ekonomičnost (šetří se vysoké náklady na chemoterapii)

lokalizovanost

menší zátěž organismu

Konkurence

fotonová terapie přesně zacílená (IMRT)

kombinace různých dávek za pomoci počítačů

Možné i s protony

2 PRAMES LATTICE DESIGN

The general layout of the PRAMES lattice is shown in Figure 1.

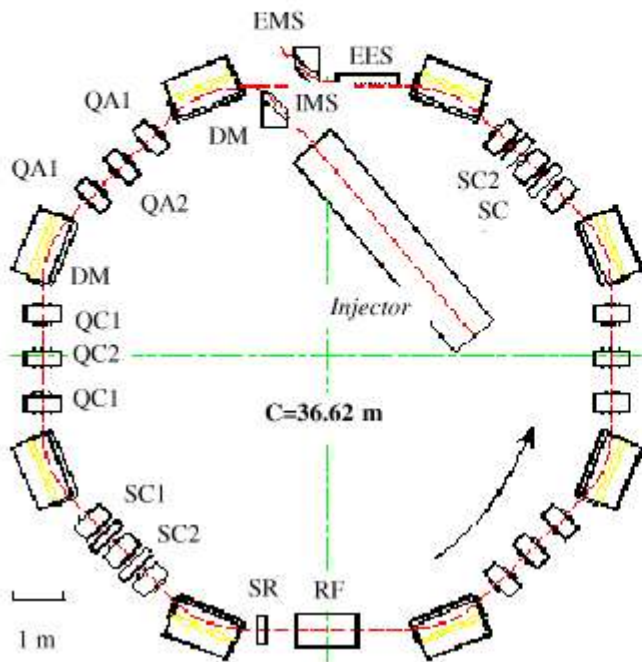


Figure 1: General layout of the ring of the PRAMES.

The main parameters of the PRAMES are listed in Table 1.

Table 1

Output kinetic energy (MeV)	60 ÷ 220
Energy variability (MeV)	< 0.4
Energy variability accuracy (MeV)	< ± 0.35
Average current (nA): patient / acceleration	7.8 / 10
Repetition rate (Hz)	1
Norm. transverse emittance($\pi, \mu\text{m}$)	1
Number protons per pulse: patient (active scanning) acceleration	$4.8 \cdot 10^{10}$ $6.25 \cdot 10^{10}$

The developed focusing structure of the ring has a race-track configuration with two long straight sections to install the injection, acceleration and extraction

The lattice parameters are listed in Table 2. The focusing structure of the ring is calculated using the MAD and the AGILE programs.

Table 2

Main parameters of the Prague proton synchrotron

I. Proton Beam Properties (round beam)	Proton Energy (MeV)	
		12
Momentum (MeV/c)	150.535	679.123
Rigidity (Tm)	0.502	2.265
Acc. Emittance ($\pi, \mu\text{m}$)	6.232	1.381
Energy spread	±0.003	±0.0014
Orbit Period (μsec)	0.77	0.208
Incoh. Vt. Tune Shift @ $6.25 \cdot 10^{10}$ protons	-0.052	-0.009
II. Lattice Parameters		
Circumference (m)	36.62	
Dipole magnet field (T): min / max	0.26599 / 1.2	
Straight Section (m)	3.5	
Bending Radius (m)	1.88768	
Effective Length of the dipole magnet (m)	1.4825	
Dipole Edge Angle (deg)	22.5	
Number of Quadrupoles: achromatic + adjusting	12 + 6	
Max. Quad. Strength (m^{-2})	5.0	
Betatron tune on the extraction: ν_x / ν_y	2.666 / 1.8	
β -functions (220MeV) β_x (m) : max / average β_y (m) : max / average	7.089 / 3.037 8.46 / 3.6297	
Dispersion (m): max / av	1.026 / 0.3337	
Chromaticity (ξ_x, ξ_y) natural corrected	-4.977 , -3.627 -4.981 , -3.609	
Transition energy	5.562	
Working region H/V, mm	80 / 55	

Průmysl

Implantace iontů

- vnesení iontů různých typů do požadované hloubky (dopování) – tvorba požadovaného mikroobvodu
- nejčastější využití urychlovačů v průmyslu
- tvorba většiny IO
- modifikace dalších vlastností
 - tvrdost, odolnost vůči korozi, únava, tření (ložiska, osy, umělé klouby, ap.)

Působení záření

změna vlastností materiálu podél dráhy částice

- polymerizace (100x rychlejší)
- úprava dřeva
- vazba polymerů do 3D struktur (PVC trubky, ap.)
- vazba polyetylénu (memory efekt – smršťovací fólie)
- odbourávání škodlivých látek (detergentů) poškozováním jejich vazeb

Konzervace potravin

radiační sterilizace místo chemické

- hotové potraviny (uzeniny, maso, ryby)
- čerstvé kazící se potraviny (ovoce vydrží o 1-2 týdny déle)
- ochrana proti hmyzu (bez insekticidů)

Sterilizace

splašky

lékařské předměty (rukavice, ap.)

Použití iontových svazků

mikromembrány 0,05-1 mm, desítky mikronů tlusté.

Mikrolitografie

produkce IC

- větší hustota integrace (0,1 mikrometru)
- použití SR

Energetika

Fúze těžkých iontů

- dosažení vysoké hustoty, tlaku a teploty v oblasti srážky
- lepší potenciál než lasery
- je to progresivní odvětví, ale k realizaci je ještě daleko

Ohřívání plazmatu

- zvyšování teploty plazmatu v TOKAMAKU
- multi-MW urychlovač iontů

Transmutace jaderného odpadu

Jaderný odpad

problém jaderného odpadu – dosud nevyřešen
překážka rozvoje JE
problém likvidace stávajícího odpadu

Roční produkce 1 GWe reaktoru po přepracování:

1000 m³ středně RA odpad

3 m³ vysoce RA odpad

Celková radioaktivita 3×10^7 Curie se sníží na 1/10 za 100 let a na 10 Curie za 1000 let

Transmutace

přeměna prvku a izotopu na jiný, stabilní, či rychleji se rozpadající

Předchozí projekty transmutací

Rychlé množivé reaktory

Speciální spalovny aktinidů pomoci rychlých neutronů

Podkritická množství iniciované urychlovači

Nové návrhy

Accelerator-Driven Systems

- Los Alamos (hvězdné války) ADS
- CERN - Carlo Rubbia Energy Amplifier

vysokoenergetické svazky protonů (1-2 GeV)

terčik z těžkých kovů (Pb)

„spallation“ neutrony, – 55 neutronů/proton

moderátor D₂O (zpomalování - termalizace)

tok neutronů $> 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

velké účinné průřezy tepelných neutronů

Pro likvidaci odpadu stačí rychlé neutrony

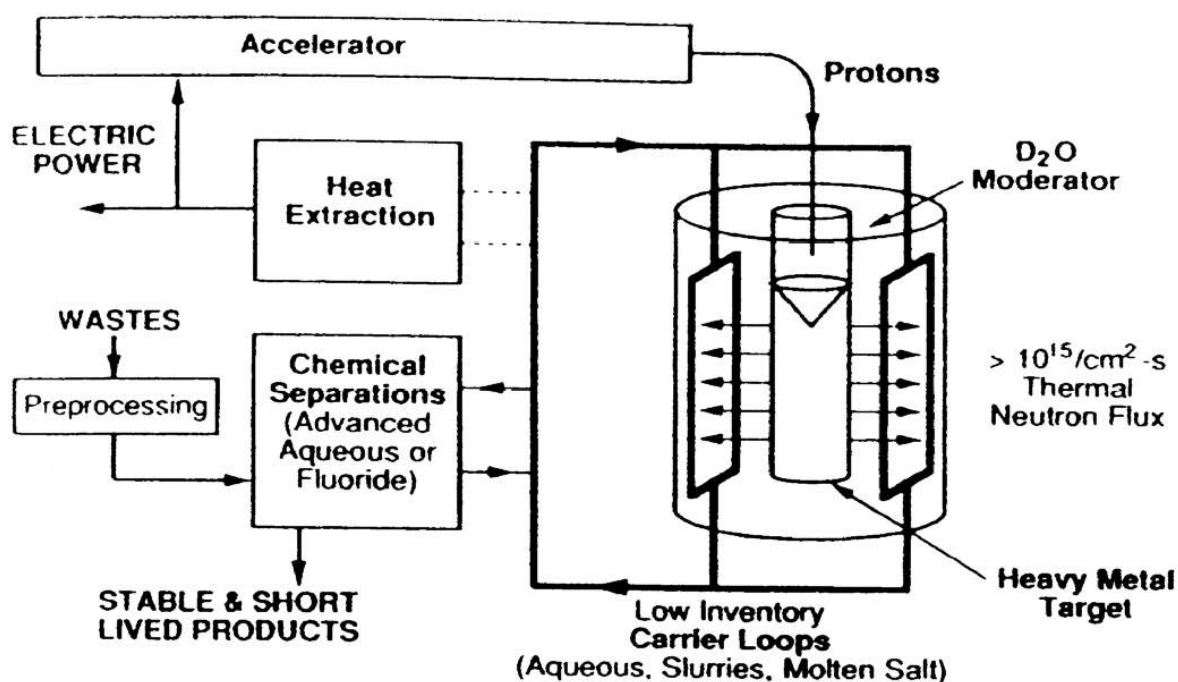


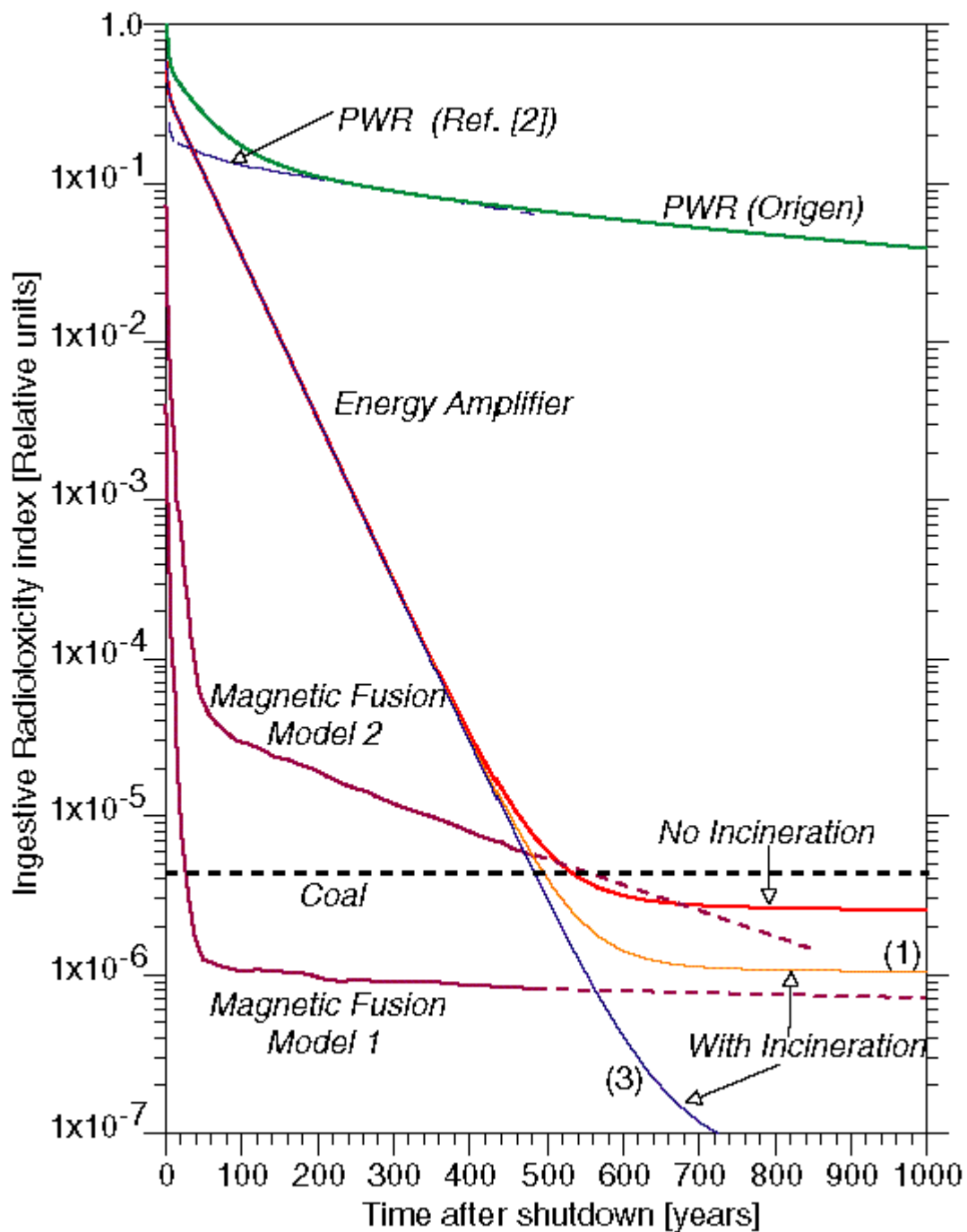
Fig. 2 High-power proton linac with a target configuration for waste transmutation. The target where fast (spallation) neutrons are produced is surrounded by a D₂O moderator. Actinide material is carried continuously through the blanket as a dilute solution in a carrier material. Some electric power can be produced [8].

Výhody

vyšší účinnosti transmutace

použití jiných štěpných materiálů

bezpečnost – jen podkritická množství ($k \sim 0,98$)



Množství plutonia ve světě pro různé energetické scénáře

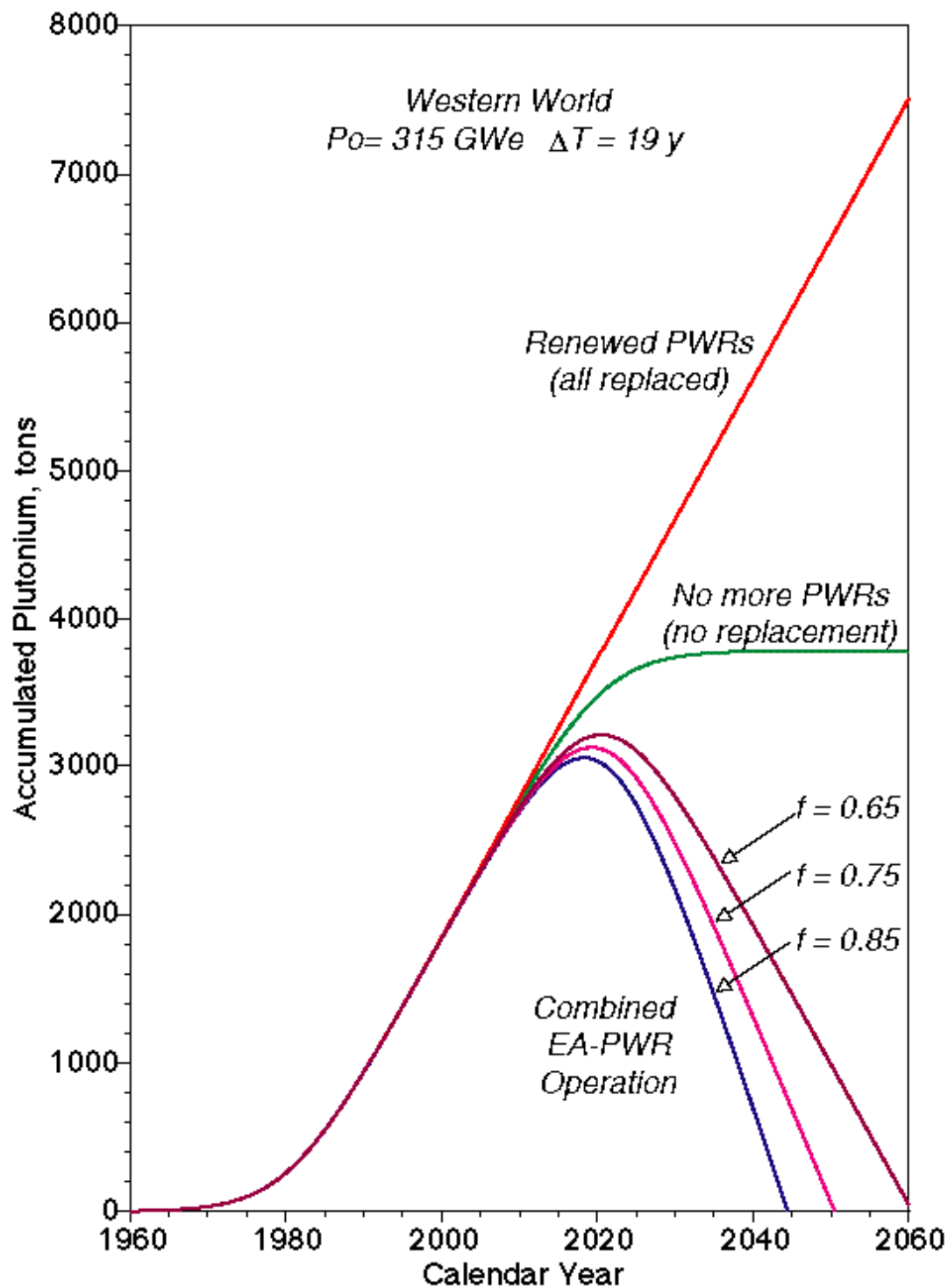


Figure 1.6

