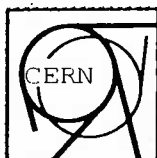


**ACCELERATEURS DE PARTICULES
POUR
LA PRODUCTION D' ENERGIE
ET
L' ELIMINATION DES DECHETS NUCLEAIRES**

**Carlo Rubbia
CERN**

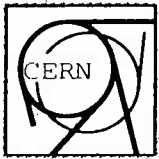


Les Buts de la Recherche

2

Cinquante ans après ses débuts, et en dépit d'un indéniable succès (6% de contribution à la production mondiale d'énergie), l'Energie Nucléaire a encore besoin de Recherche Fondamentale et de Développements majeurs. Les buts principaux devraient en être:

- améliorer son impact sur l'environnement. En particulier, il faut éliminer, ou tout au moins réduire fortement, les déchets radioactifs de longue vie de l'aval du cycle, y compris ceux qui ont été produits par les REP existants. La référence, que nous empruntons à la Fusion, est que la radioactivité totale de l'inventaire des déchets soit comparable à celle des cendres de combustion du charbon, après quelques siècles de "refroidissement". *Cela pour une même énergie produite.*
- consumer entièrement le combustible naturel: à présent seulement $\approx 0.4\%$ de l' Uranium extrait est brûlé, le reste est un déchet. Utiliser complètement le combustible, c'est aussi réduire les déchets de longue période.

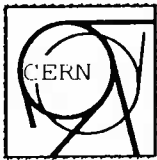


Les Buts de la Recherche (suite)

- Améliorer la sûreté, qui, de probabiliste, doit devenir déterministe
- Eliminer ou tout au moins réduire fortement les risques de prolifération, puisque la demande d'énergie provient surtout des Pays en Voie de Développement (PVD), où les changements sont, par définition, rapides, au détriment de la stabilité politique .
- Une simplicité technologique maximale alliée aux coûts les plus bas, afin d'être compétitif avec les énergies d'origine fossile pour assurer le déploiement dans les PVD où se trouvent les plus grands marchés.

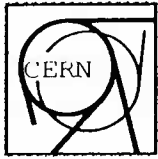
Malheureusement, jusqu'ici la préférence est allée à l'énergie la moins chère.

Ceci ne changera vraisemblablement pas dans un avenir prévisible !



Principaux Points de la Présentation

- En substance, ma présentation vise à montrer comment, après un travail de trois ans au CERN, incluant plusieurs expériences, une petite équipe internationale est arrivée à la conclusion que ces buts peuvent être raisonnablement atteints en faisant appel à des systèmes "hybrides", qui combinent un accélérateur de particules avec les technologies des réacteurs rapides.
- Ces systèmes peuvent opérer, tenant compte des besoins actuels:
 - soit en symbiose avec l'ensemble des REP existants, afin d'améliorer la performance de ces systèmes et leur impact sur l'environnement
 - *en extrayant davantage d'énergie des "déchets" et*
 - *en éliminant les déchets de longue période*
 - soit comme un système entièrement nouveau avec une production minimale de déchets, basé sur la filière Thorium.
- Après quelques généralités, je décrirai brièvement le travail accompli et les prochaines étapes de ce programme, en traitant les plus importants parmi les pourquoi? et les comment?



Des faisceaux de particules pour la production d'énergie ?

5

Les faisceaux de particules accélérées sont l'outil classique pour induire des réactions nucléaires. Peut-on les utiliser à des réactions nucléaires pour produire de l'énergie ?

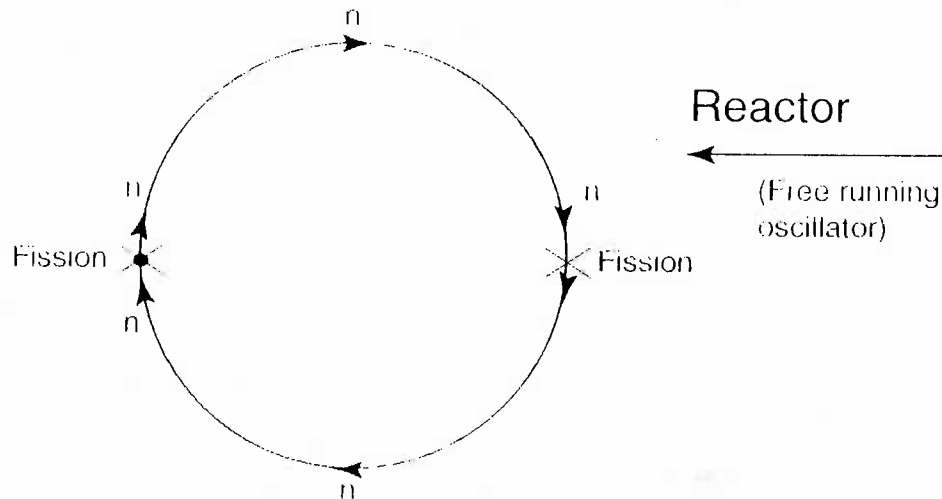
- Les faisceaux de basse énergie (≤ 10 MeV) produisent un nombre insuffisant de réactions, car les particules sont *arrêtées par les pertes par ionisation avant qu'elles n'interagissent* (il faudrait un Plasma $\Rightarrow \Rightarrow$ Fusion)
- Les faisceaux de haute énergie (≥ 200 MeV) ont un parcours suffisant *pour que les interactions prédominent*
- Choix de la réaction: induite par neutrons, car la barrière de Coulomb empêche la pénétration de particules chargées dans les noyaux de Z appréciable. Les rayons Gamma ont un taux d'interaction trop petit.

Réaction pour la production d'énergie:

$\Rightarrow \Rightarrow$ la Fission, qui produit 200 MeV/événement

- Un proton de 1000 MeV produit dans le plomb environ 40 neutrons par spallation. Afin de produire de l'énergie, les neutrons doivent interagir avec un milieu fissile. Ces neutrons, produits par fission, prolongent la cascade par un facteur $1/(1-k)$, k = coefficient de multiplication ($k < 1$, pour éviter la criticalité) Posons $k = 0.9$. On produira donc $40 \times 10 = 400$ neutrons.
- Si 40% de ceux-ci produisent des fissions, on aura $400 \times 0.4 = 160$ fissions, qui fourniront $160 \times 200 = 32'000$ MeV. On obtient donc un gain en énergie $G = 32'000/1000 = 32$, plus que suffisant pour alimenter l'accélérateur (rendement > 50%).
- Sur les 60% restant, 20% sont des pertes et 40% des réactions de surgénération, produisant de nouveaux noyaux fissiles à partir d'un matériau non-fissile ($^{232}\text{Th} \rightarrow \rightarrow ^{233}\text{U}$ or $^{238}\text{U} \rightarrow \rightarrow ^{239}\text{Pu}$).
- De cette façon, le combustible non-fissile est activé. Le temps de vie du matériau fissile est relativement court et l'on produit, à chaque instant, exactement la quantité nécessaire. On réalise l'équilibre dans la surgénération (ou "breeding equilibrium").

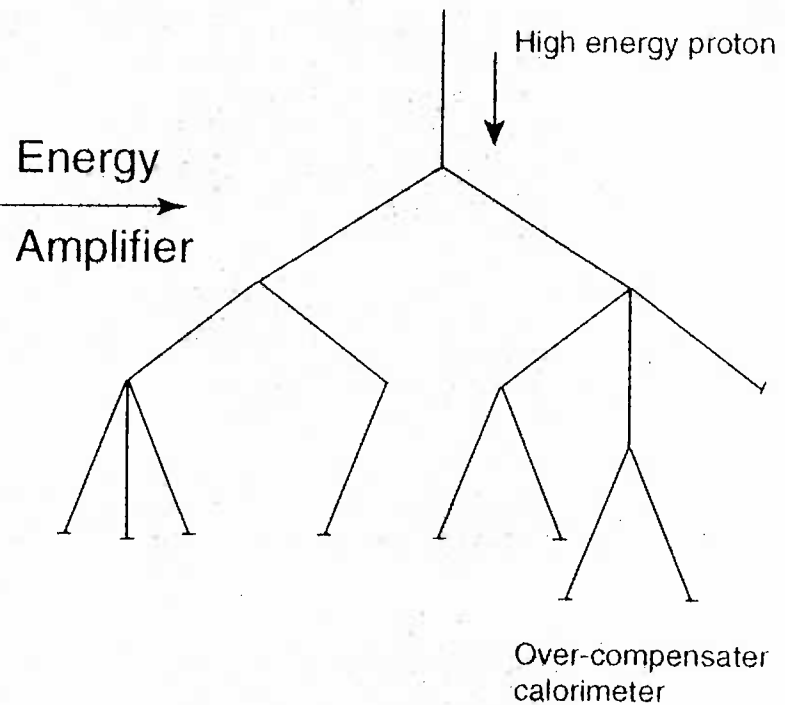
Chain Reaction



Self sustained process

Time derivative of produced power kept = 0 by control

Nuclear Cascade

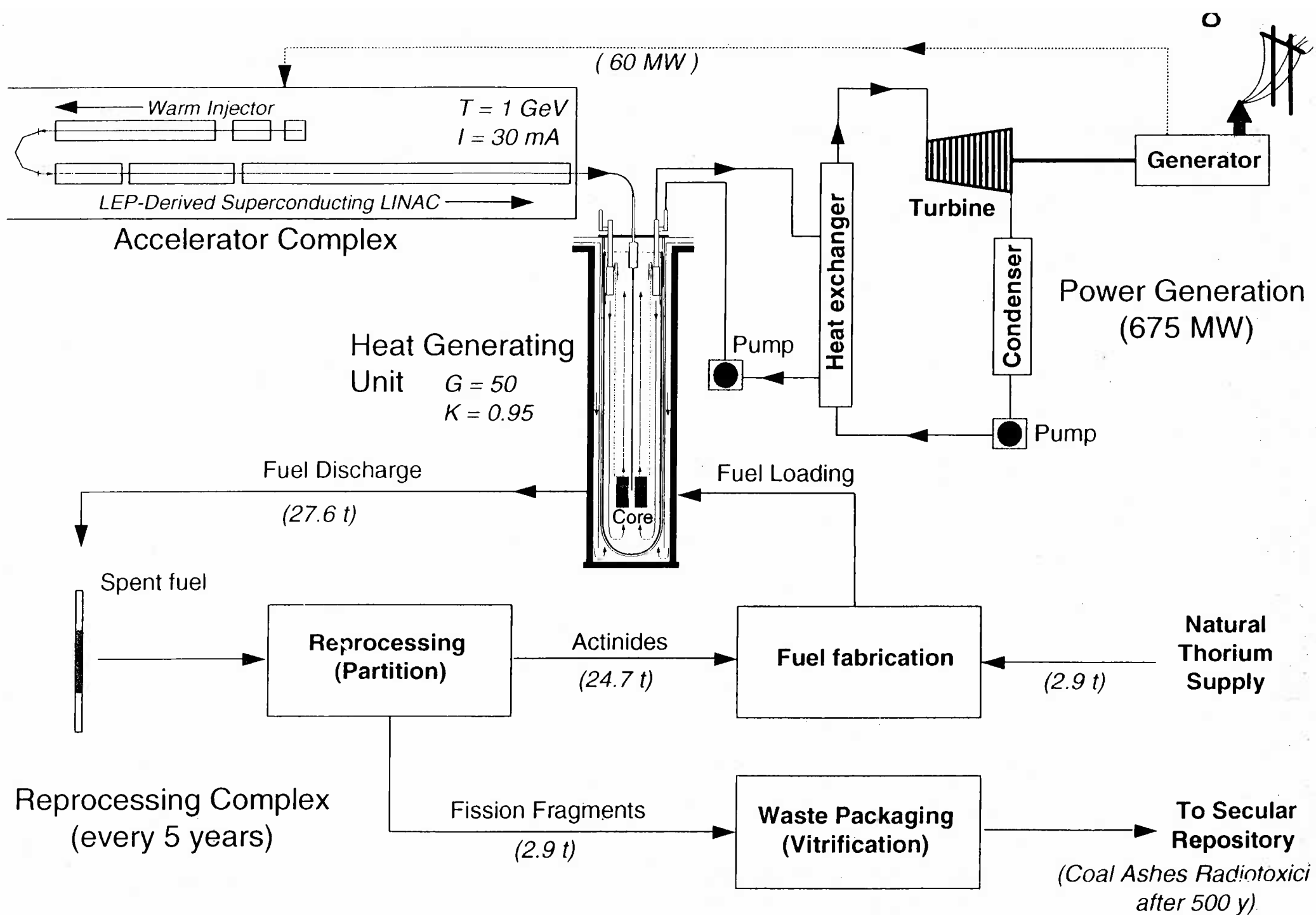


Externally driven process

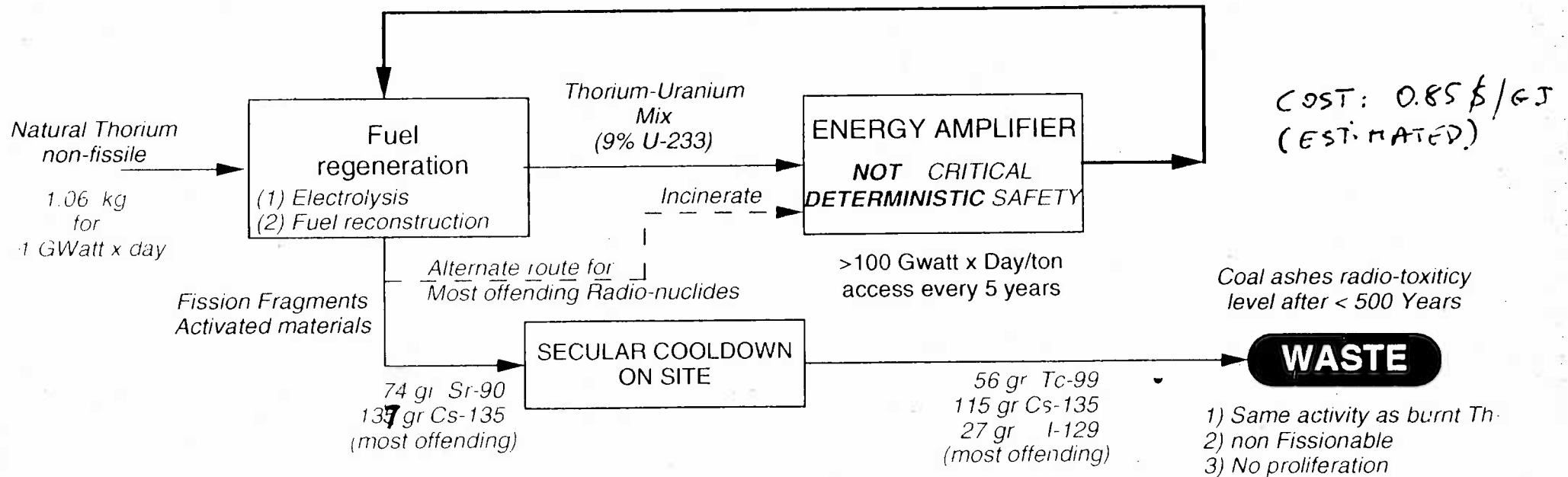
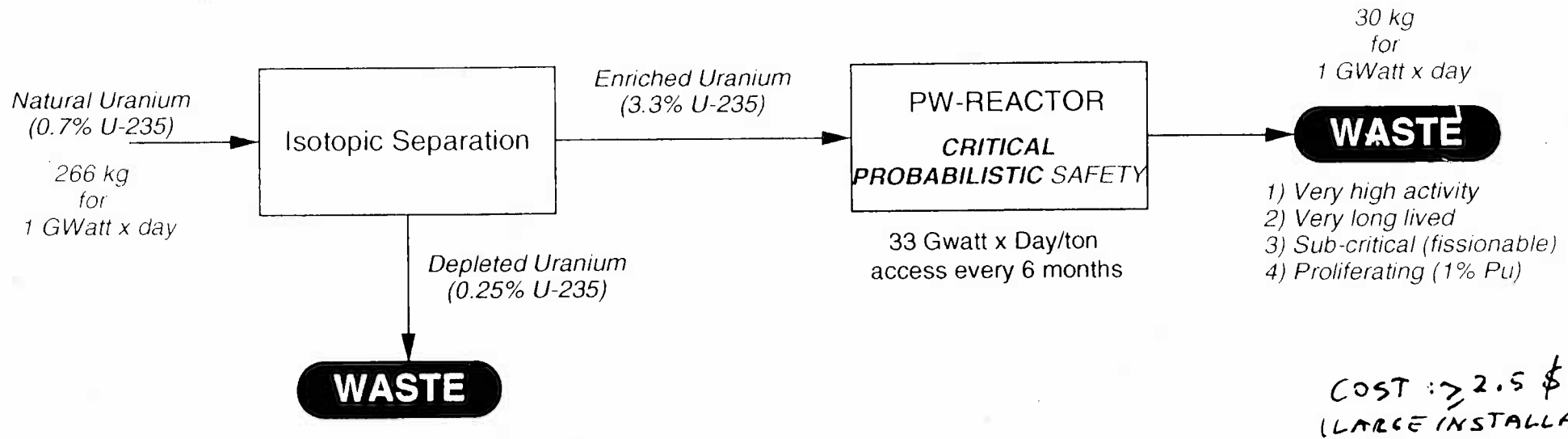
⇒ Constant "Gain"

$$E_{\text{tot}} = G \times E_p$$

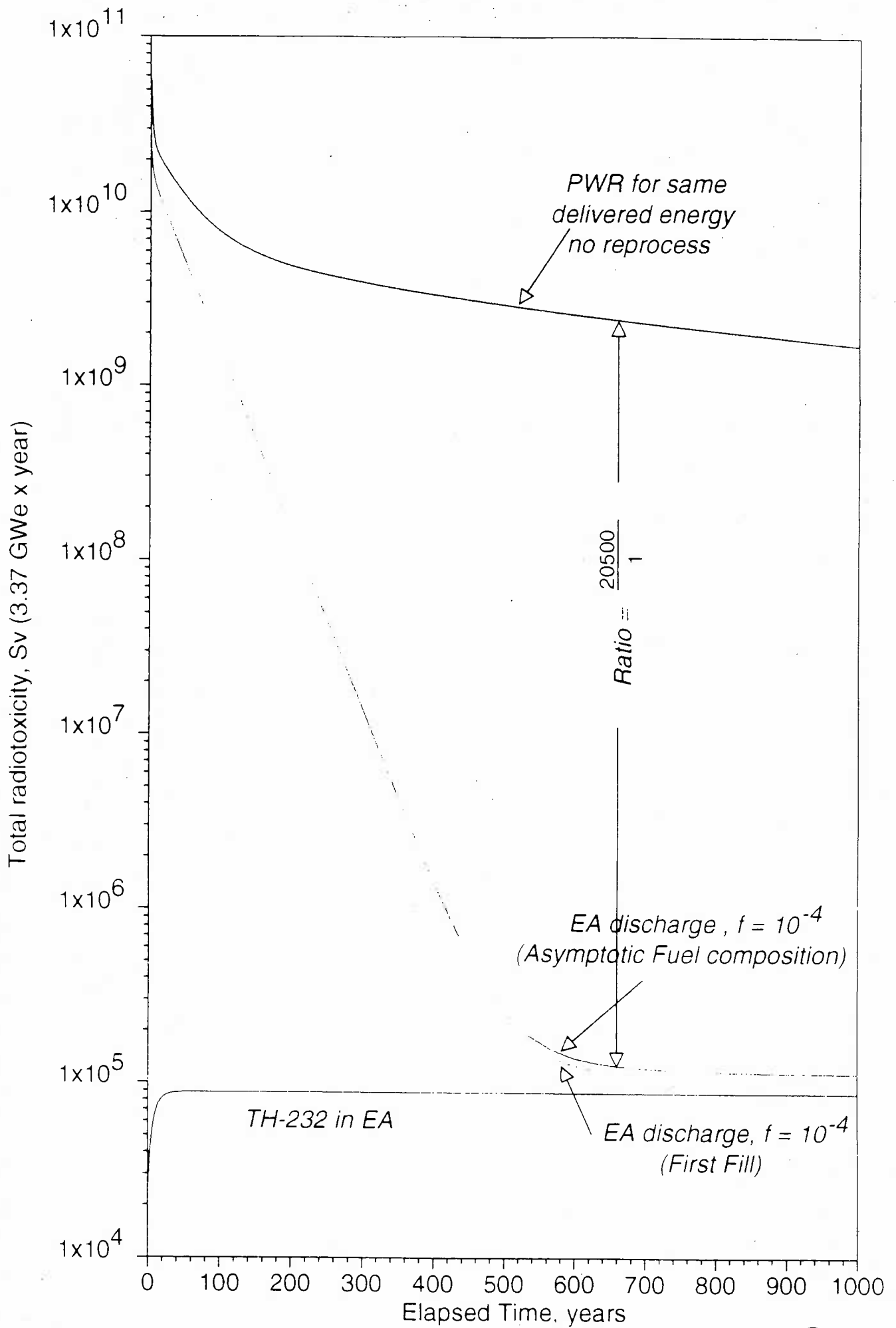
Produced Power Beam Power



NUCLEAR:OPEN CYCLE



FA:CLOSED CYCLE ON SITE



6355 Figure 6

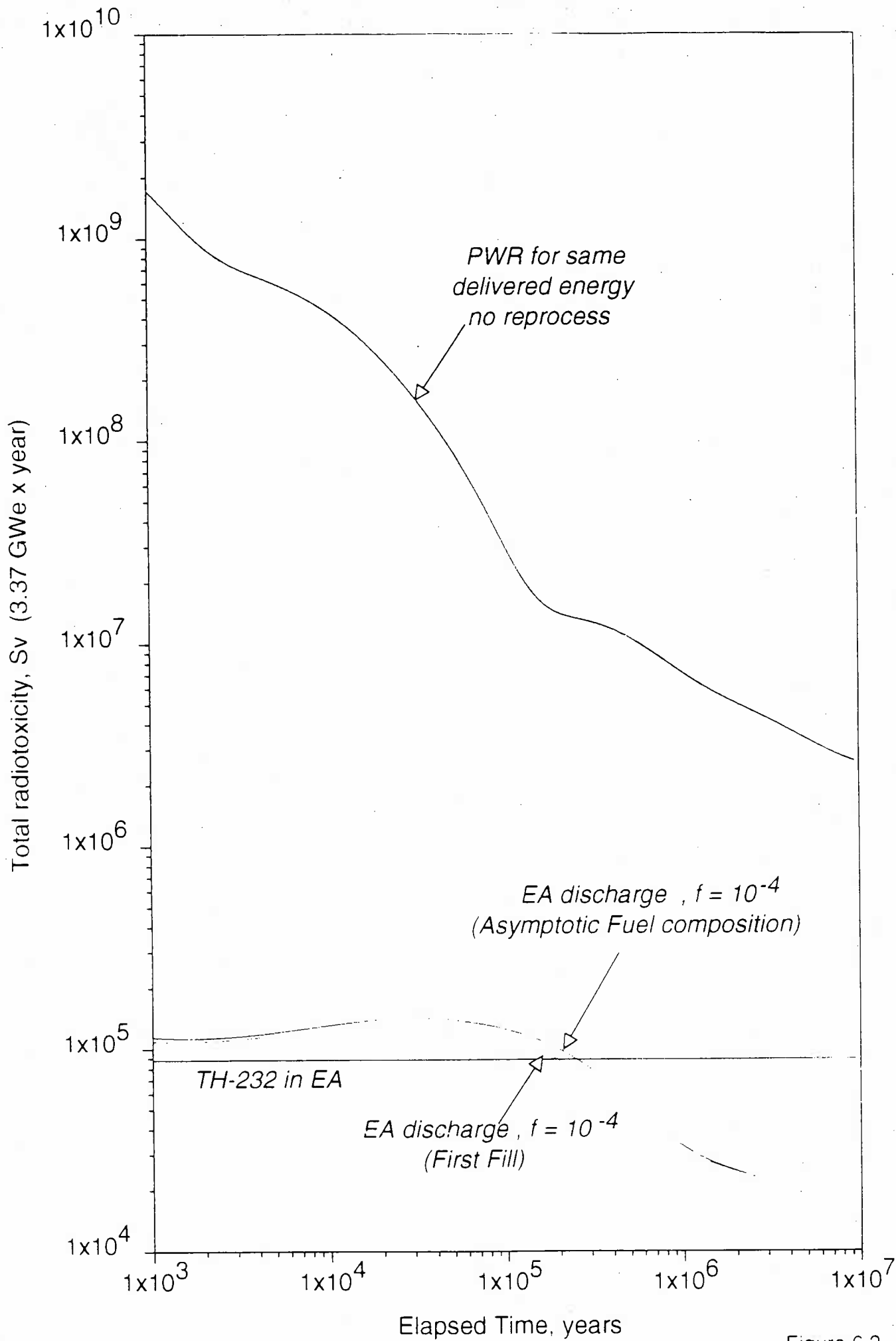


Figure 6.2

COAL BURNING

3'700 Tons
for
1 GWatt x day

COST: 3.0 \$/GJ
(WITHOUT ENV. PROT.)

Natural Coal

Mining, Transport

FUMES

13'600 Tons of CO₂
≥ 200 Tons of SO₂
200 Tons of NO-x

Particulate

Contaminants

100 GW x day of Greenhouse heat

COAL FIRED
BURNER

ASHES

Same radio-toxicity
as EA after 500 years

PWR spent fuel

WASTE

REPROCESSING

(1) Oxide ⇒ Metal
(2) Electrolysis

Rest

SECULAR COOLDOWN
ON SITE

WASTE

Incinerate

Higher Actinides, mostly Pu,
+ most offending long lived isotopes

Natural Thorium
non-fissile

Fuel
regeneration

(1) Electrolysis
(2) Fuel reconstruction

Thorium--
Plutonium Mix
(11% Pu)

ENERGY AMPLIFIER

NOT CRITICAL
DETERMINISTIC SAFETY

>100 Gwatt x Day/ton

Coal ashes radio-toxicity
level after < 500 Years

Uranium fuel
(mostly U-233)
(+70% OF ENERGY)
IN PWR

Fission Fragments
Activated materials

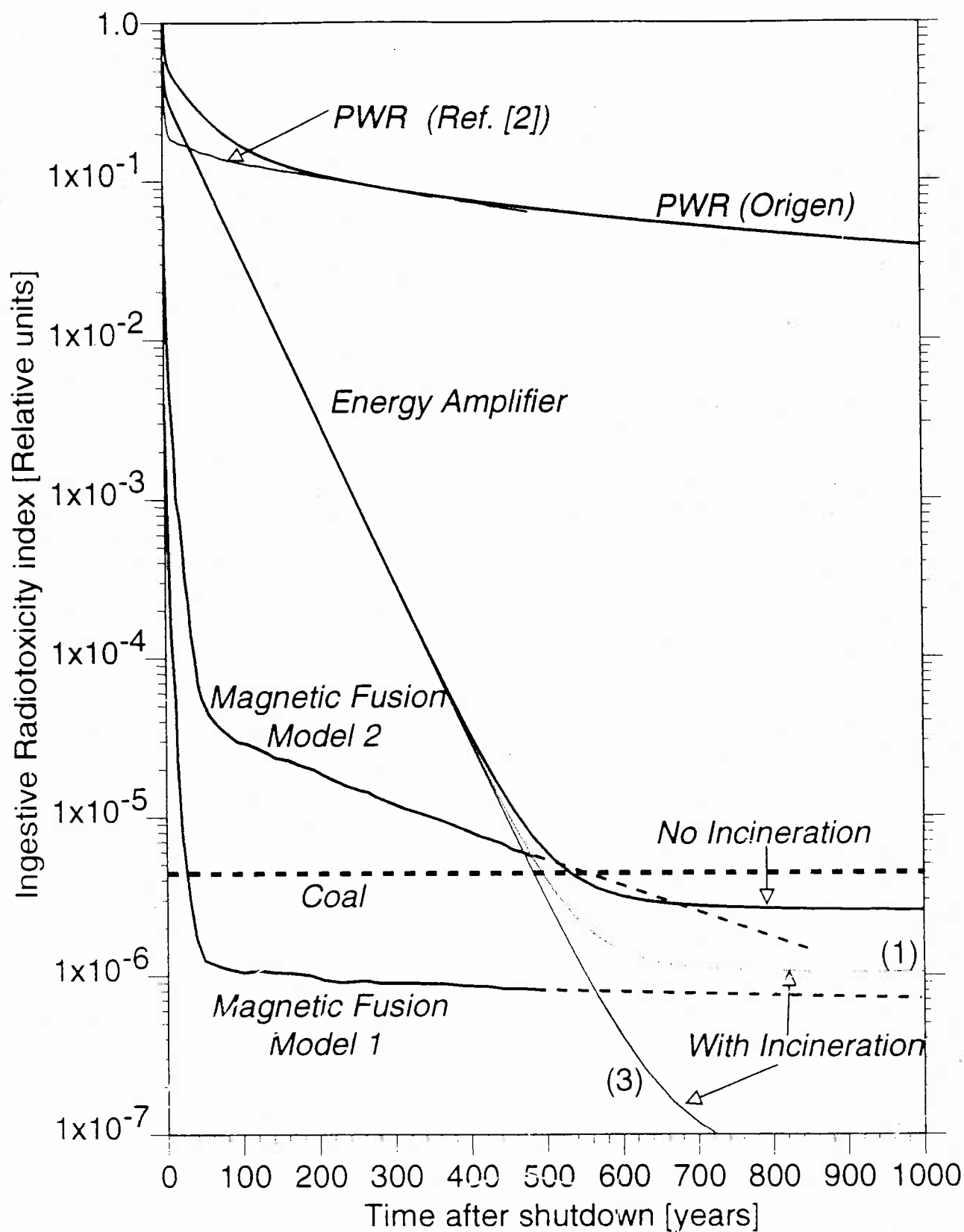
Incinerate

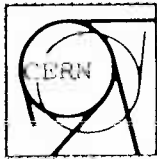
SECULAR COOLDOWN
ON SITE

WASTE

WASTE INCINERATION

RECOVERED ENERGY
1 Ton Pu ⇒ 14 MILL BOIL



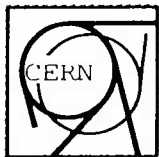


Comparaison avec la Fusion

Notre méthode, bien que basée sur la Fission, peut se comparer à la Fusion, car elle présente un potentiel énergétique et un impact sur l'environnement similaires.

Méthode	Réserves	Combustible	Principaux Résidus
Fusion	Lithium	Tritium	Activations
Amplificateur d'Energie	Thorium	Uranium	Fragments de Fission
	Réserves Mondiales Similaires en terme d'Energie	Radiotoxicité Similaire	Radiotoxicité Similaire

- Dans l'EA, le champ magnétique est dipolaire (accélérateur), dans la fusion il est toroïdal et beaucoup plus grand (TOKAMAK)
- La construction de l'EA est beaucoup plus simple, il n'existe pas d'obstacle technologique majeur, puisque l'on utilise les technologies déjà connues des accélérateurs et des réacteurs
- Le prix de l'énergie produite est nettement plus bas.



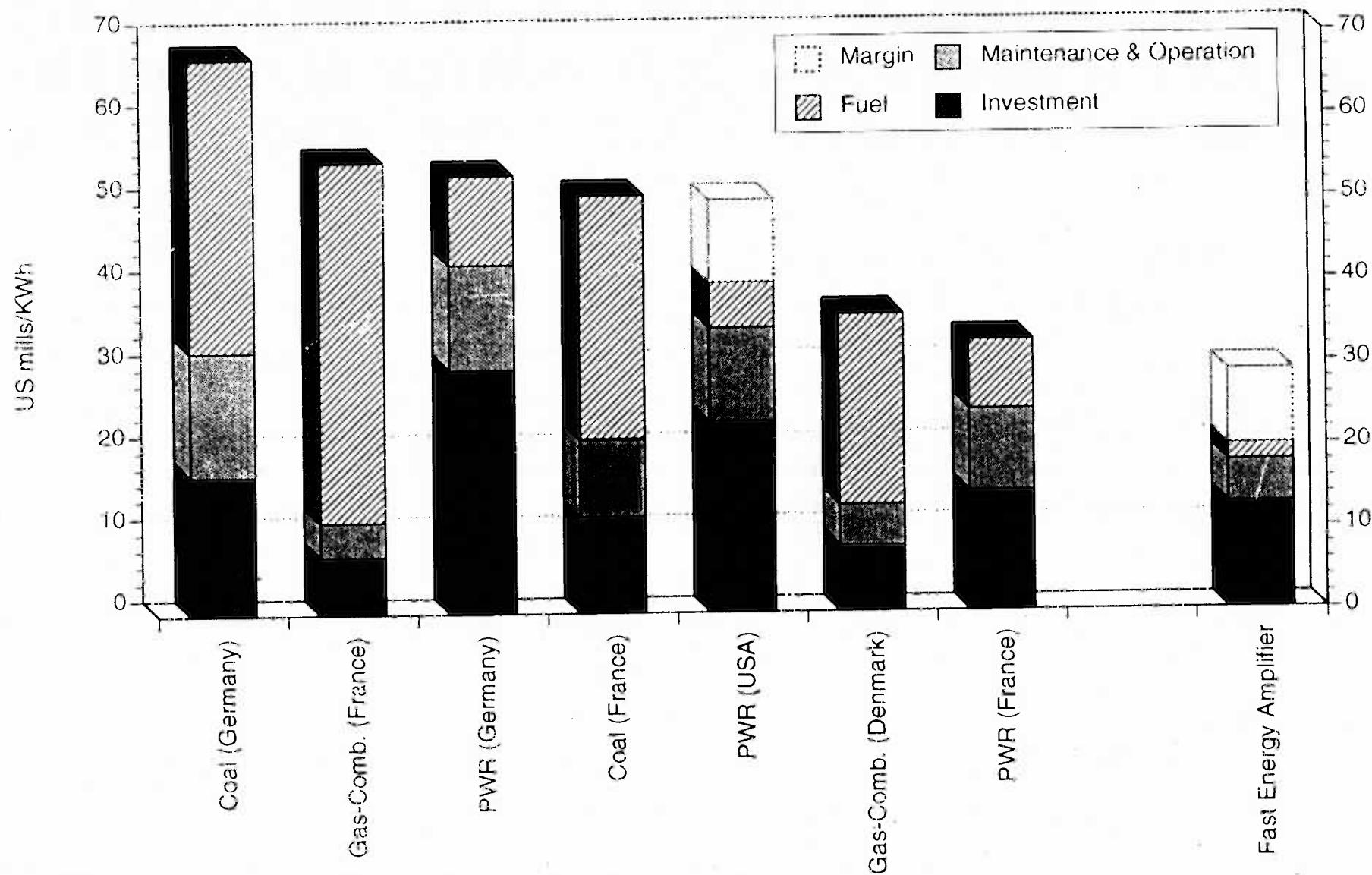
Comparaison avec l'énergie nucléaire classique (REP)

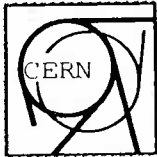
13

Comparé aux réacteurs ordinaires, l'AE

- utilise un combustible naturel (comme CANDU), mais avec une combustion massique ("burn-up") plus grande (jusqu'à 150 GW j/t) à chaque cycle et une utilisation totale (nombre infini de cycles MOX) jusqu'à combustion complète.
- génère son propre matériau fissile (à partir de Th ou U appauvri)
- recycle ses propres "résidus" actinides. Les seuls déchets produits sont des Fragments de Fission, dont l'activité, bien que forte, est de bien moindre durée de vie.
- peut brûler entièrement les déchets Pu des REP ainsi que le Pu des surplus militaires.
- peut éliminer certains Fragments de Fission à vie longue.
- présente des caractéristiques de sûreté déterministe (pas d'accidents de criticalité, pas de fusion du coeur)

Tout ceci résulte directement de l'utilisation de neutrons très rapides (pratiquement pas modérés dans le plomb et le combustible) et de la nature sous-critique du dispositif.





Les neutrons dans un milieu très diffusif

15

- Un programme prenant en compte l'environnement doit se fixer pour but l'élimination des produits de fission à vie longue particulièrement pernicioeux (129-I, 99-Tc). Ceci demande une efficacité de capture neutronique accrue qui est obtenue par
 - (1) l'introduction d'une faible masse du matériau à transmuter dans un milieu transparent et diffusif pour les neutrons.
 - (2) l'exploitation des grandes valeurs des sections efficaces correspondant à des résonances qui seront inévitablement traversées (avec des pas en énergie très fins) lors du ralentissement, dans un milieu de masse atomique moyenne ou élevée, de neutrons dont l'énergie initiale est importante (MeV)
- Le plomb est un milieu approprié, de faible léthargie et de grande transparence aux neutrons. L'échantillon absorbant (99-Tc) est dilué à l'intérieur de la masse du milieu diffusant. (Pb)
- Pour employer une analogie optique, on choisit un milieu diffusif mais très transparent aux neutrons. En le dopant avec une faible quantité du matériau à éliminer, on le rend "opaque". La plupart des neutrons sont alors capturés par ces impuretés.

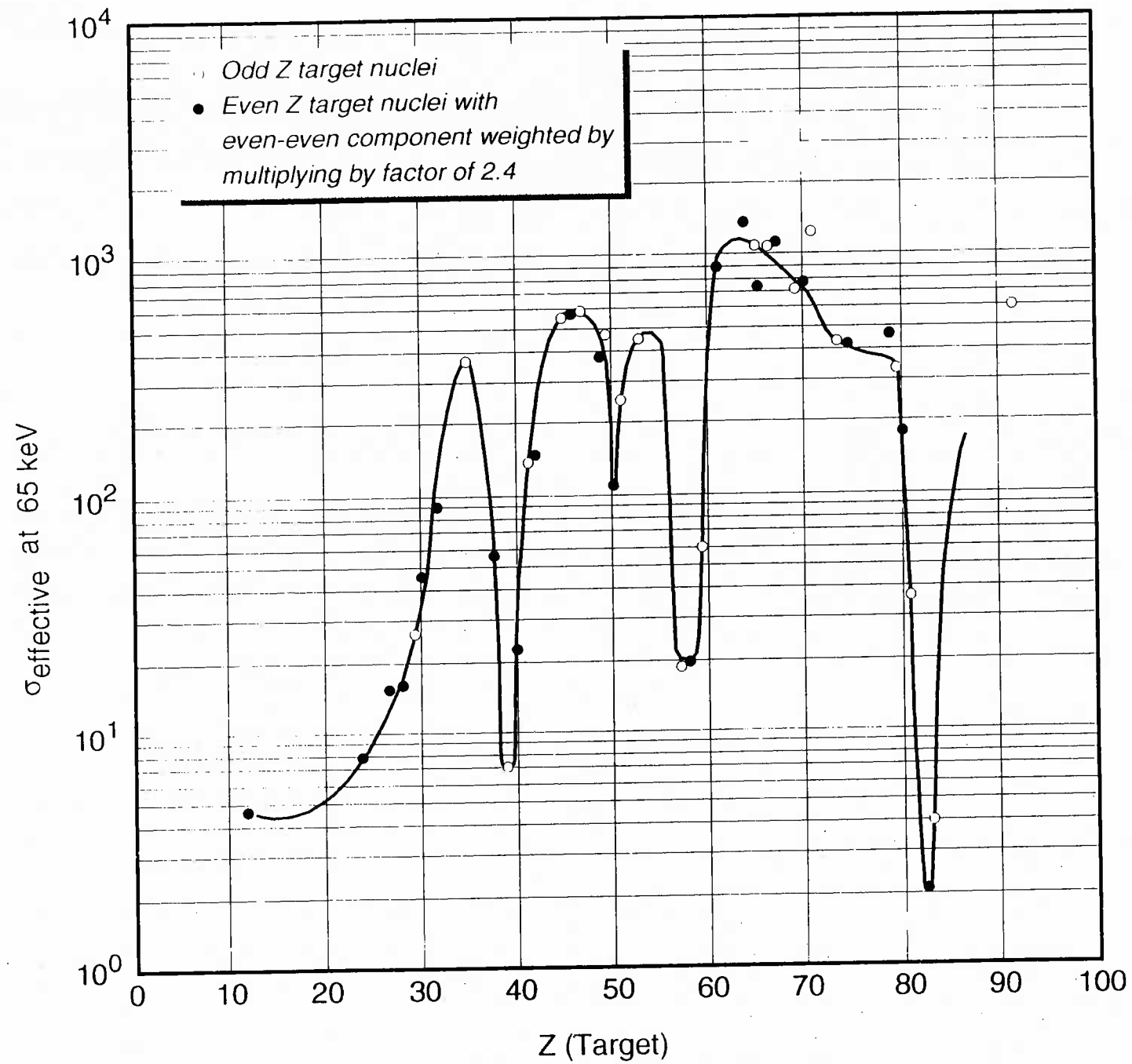
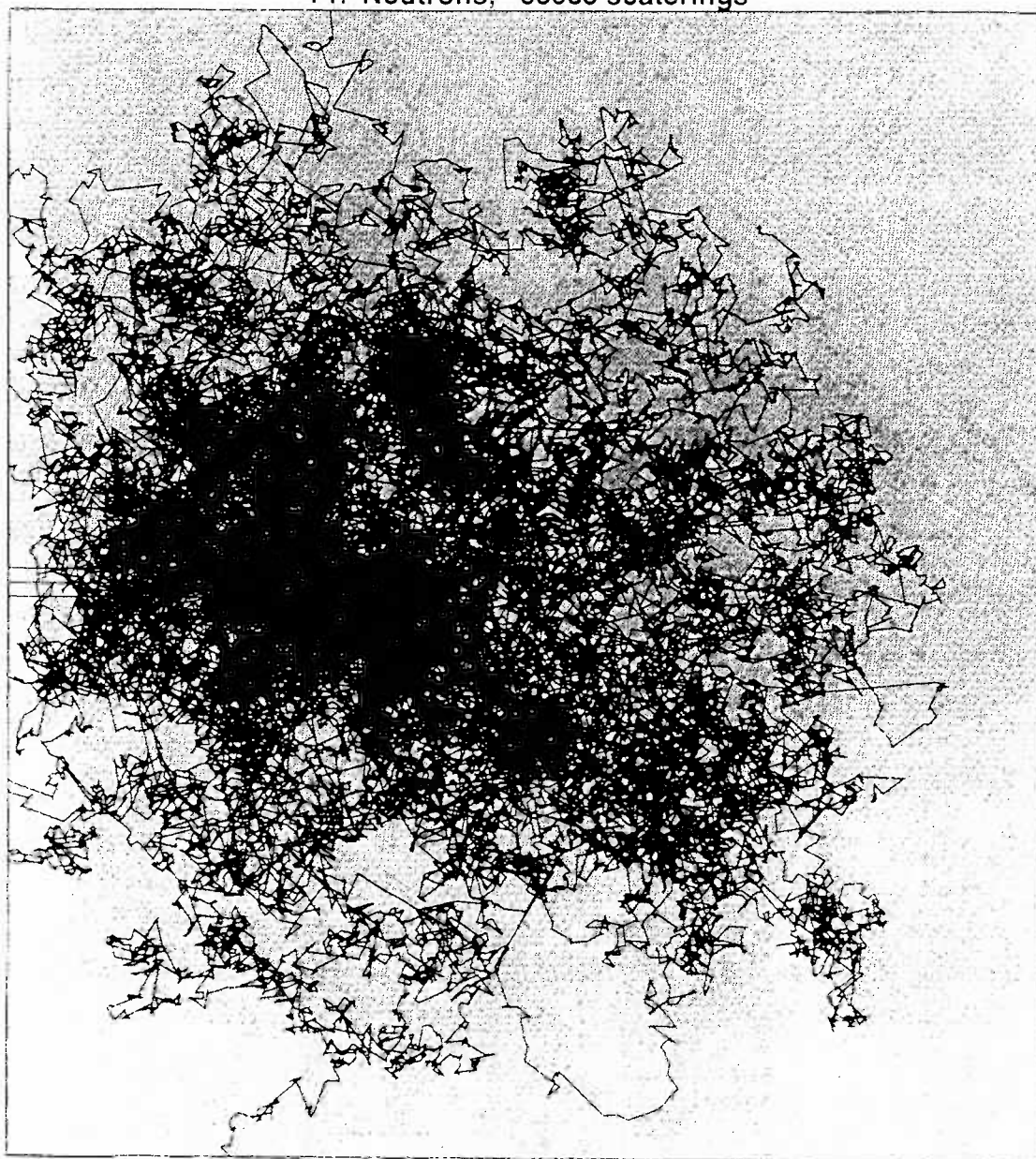


Figure 2.1

TARC experiment

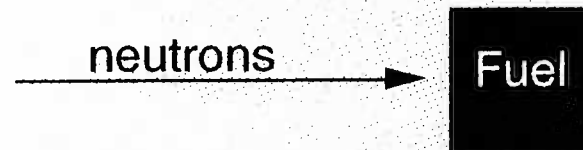
3.5 GeV/c proton

147 Neutrons, 55035 scatterings

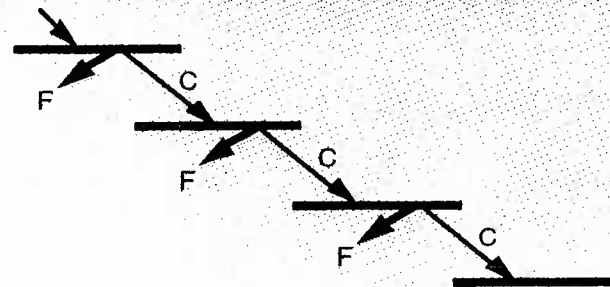


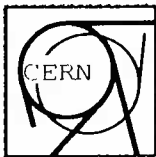
Un peu de Physique

- Supposons pour simplifier un petit échantillon de combustible exposé à un flux de neutrons intense.



- A la suite des réactions induites par ces neutrons, captures et fissions principalement, un certain nombre de transformations vont se produire, qui rappellent les chaînes de désintégration d'une substance radioactive.
- Au bout d'un certain temps, un équilibre s'établira et les taux de production et de transformation seront équivalents (problème classique des baignoires et des robinets...)



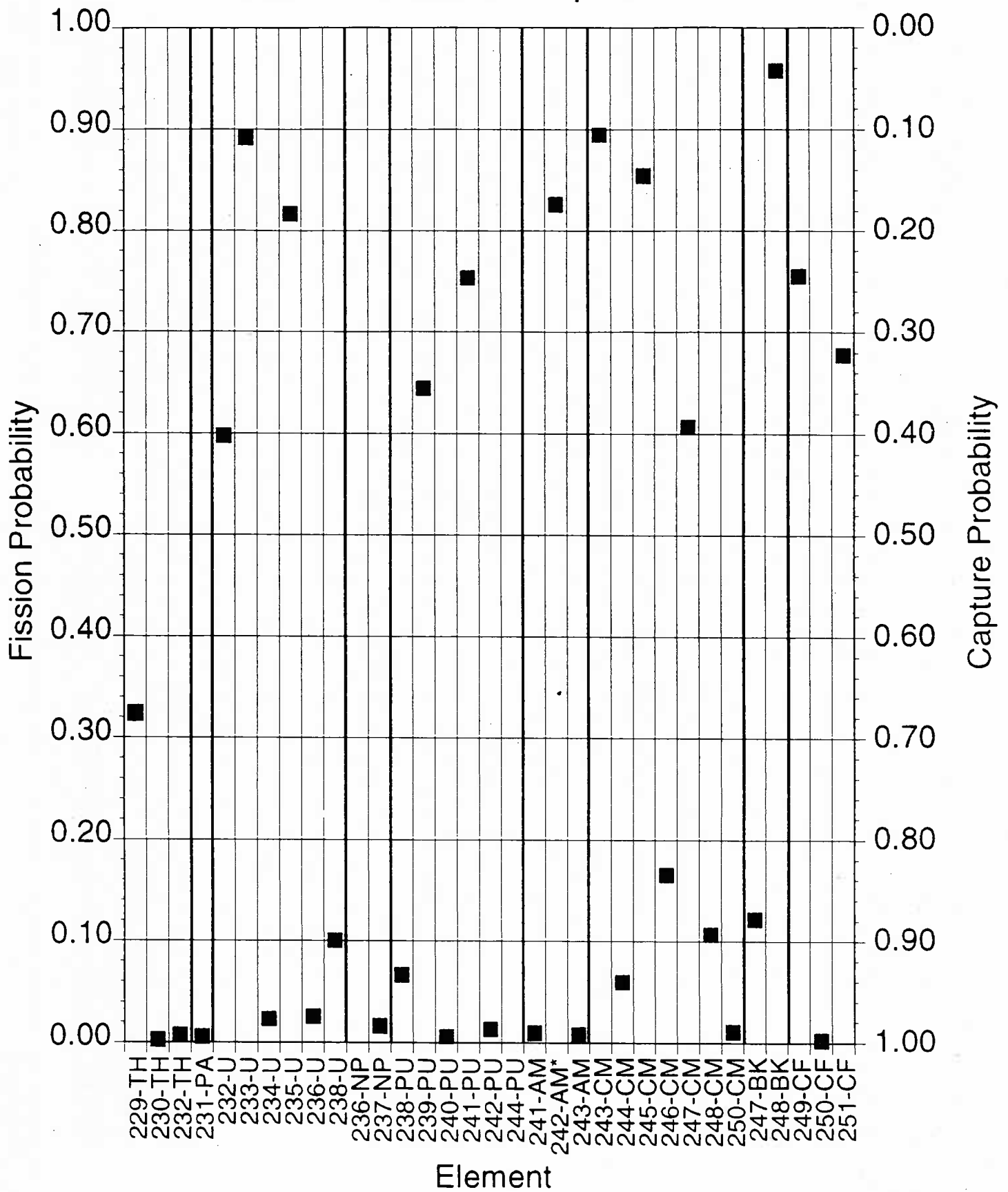


L'importance des neutrons rapides

19

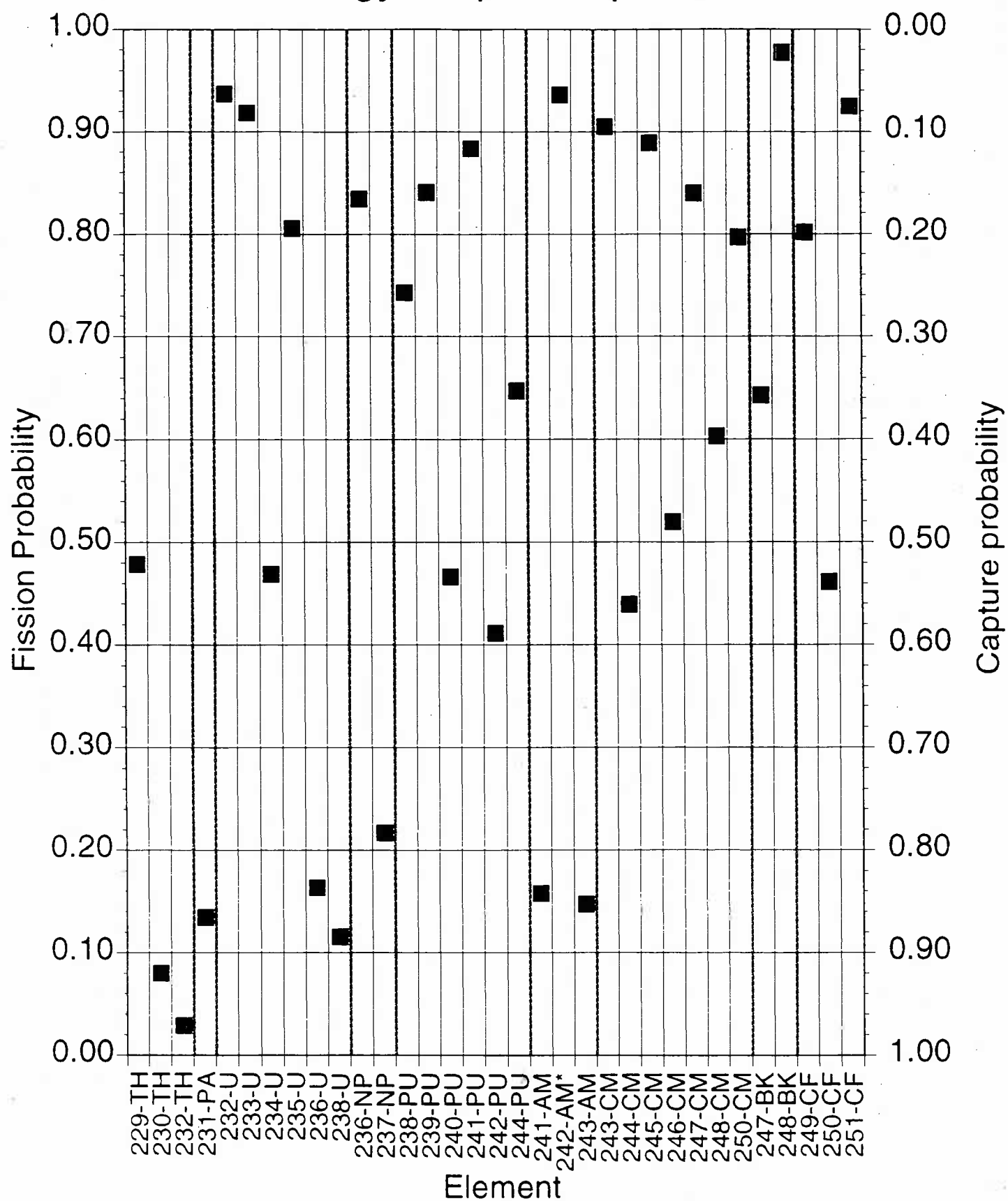
- On sait que le processus de combustion dans un spectre thermique (REP) ne peut continuer indéfiniment: après l'épuisement du stock initial de ^{235}U , la réactivité du "mélange asymptotique à l'équilibre" devient insuffisante, les isotopes "pairs" ayant une probabilité de fission petite ou nulle.
- Au contraire, dans un spectre rapide, la plupart des isotopes ont une grande probabilité de fission. Ceci a deux conséquences :
 - la réactivité (k) du mélange à l'équilibre est indépendante de l'évolution du mélange: le "vieux" combustible a essentiellement la même réactivité que du combustible "neuf". On peut donc brûler le combustible jusqu'à épuisement.
 - Les concentrations relatives diminuent rapidement avec le "rang" des éléments car elles sont fortement atténuées par les fissions, c.a.d que le mélange asymptotique n'est pas très différent du mélange initial.
 - La fraction de fission est suffisante pour permettre un breeding complet à partir d'un combustible naturel non-fissile (Th, U-238) qui brûlera en totalité.
- Les actinides résultant de la fin d'un cycle peuvent être utilisés comme "amorces" du cycle suivant (nombre indéfini de cycles MOX). Les seuls véritables déchets sont les fragments de fission.

Thermal Reactor Spectrum



Only elements with lifetime > 10 years are shown

Fast Energy Amplifer Spectrum



Only elements with lifetime > 10 years are shown

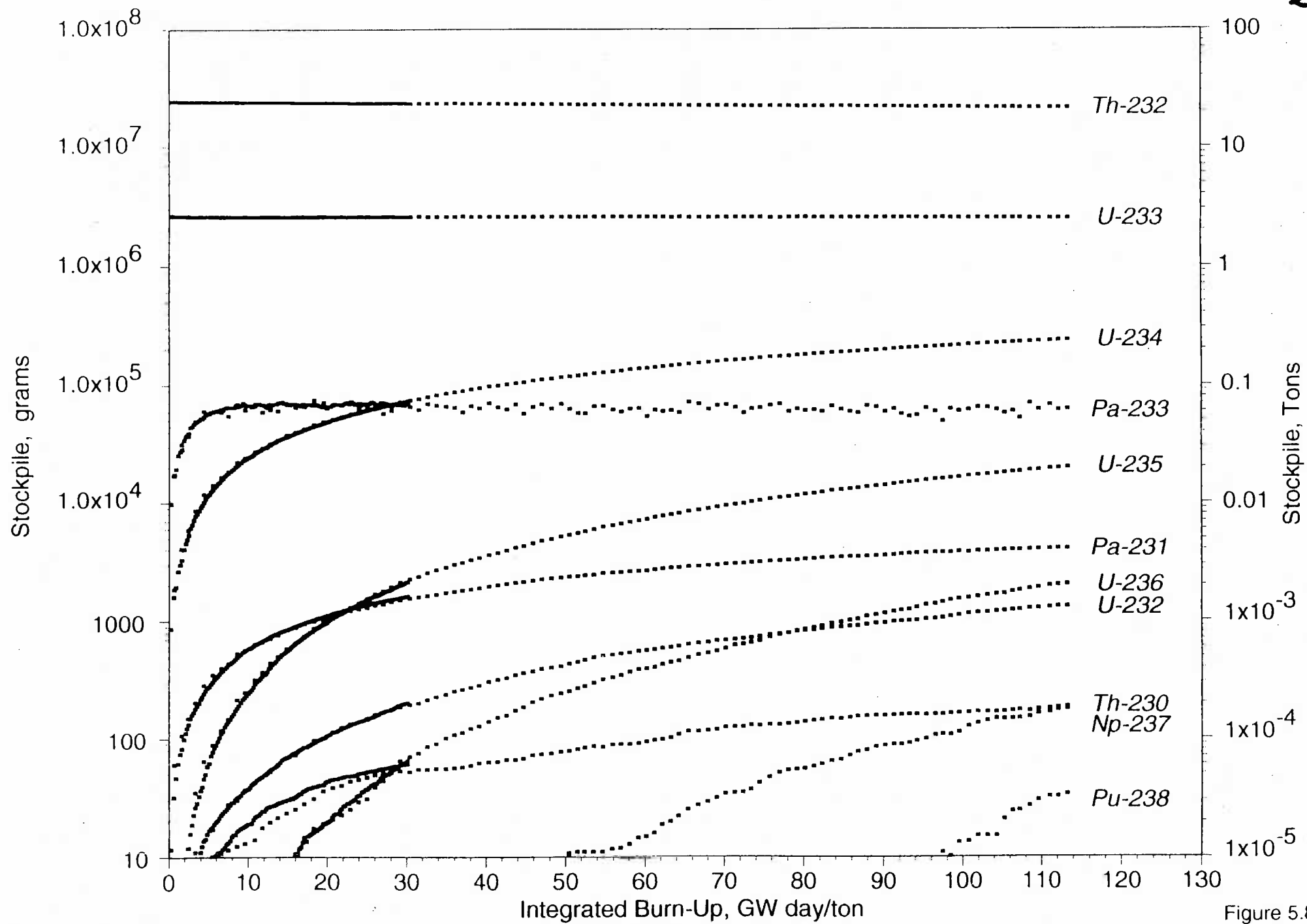


Figure 5.8

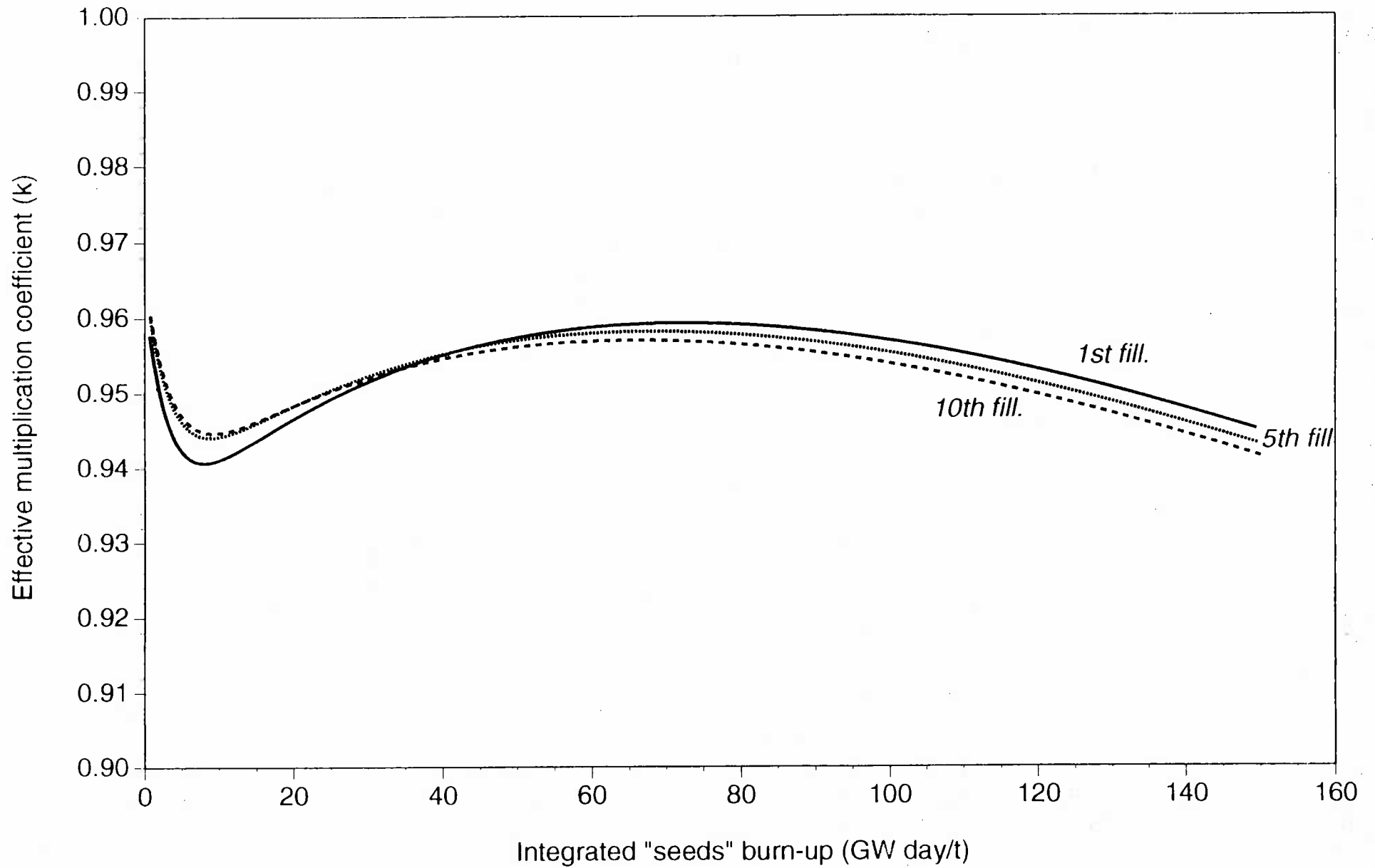


Figure 2.10

Table 2.5 - Trans-uranic and Protactinium from discharge for asymptotic fuel concentration.
Integrated burn up is 150 GW × day/t.

Element	Partial density (gr/cm ³)
²³¹ Pa	0.9179×10 ⁻⁴
<i>Total Pa</i>	0.9179×10 ⁻⁴
²³⁶ Np	0.5469×10 ⁻⁷
²³⁷ Np	0.1428×10 ⁻²
<i>Total Np</i>	0.1428×10 ⁻²
²³⁸ Pu	0.5640×10 ⁻³
²³⁹ Pu	0.7141×10 ⁻⁴
²⁴⁰ Pu	0.6185×10 ⁻⁵
²⁴¹ Pu	0.3924×10 ⁻⁶
²⁴² Pu	0.1887×10 ⁻⁷
<i>Total Pu</i>	0.6420×10 ⁻³
²⁴¹ Am	0.2638×10 ⁻⁷
²⁴³ Am	0.8461×10 ⁻⁹
<i>Total Am</i>	0.2722×10 ⁻⁷
²⁴² Cm	0.4182×10 ⁻⁹
<i>Total Cm</i>	0.5500×10 ⁻⁹
<i>Total discharge</i>	2.1618×10 ⁻³

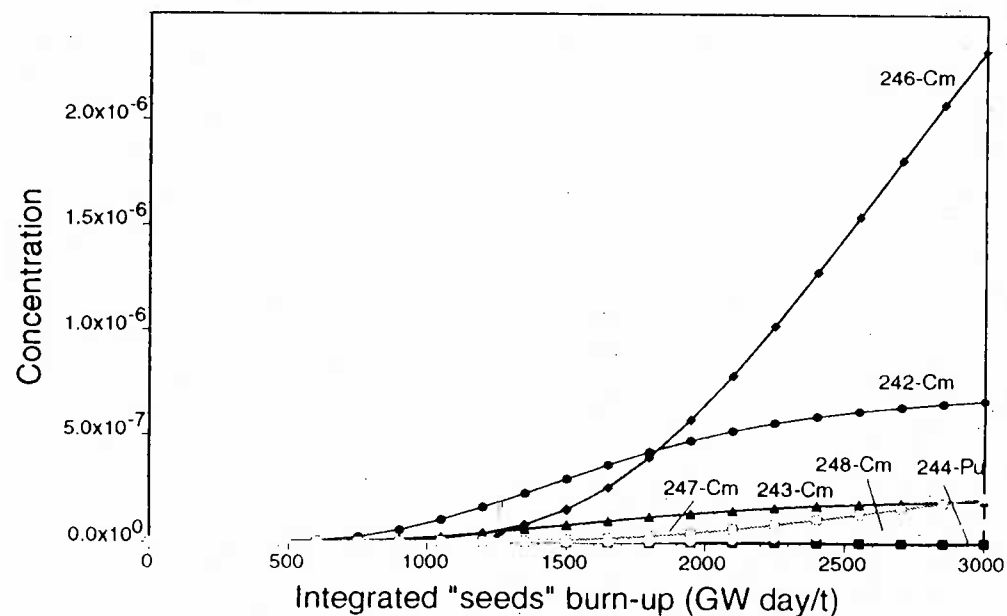
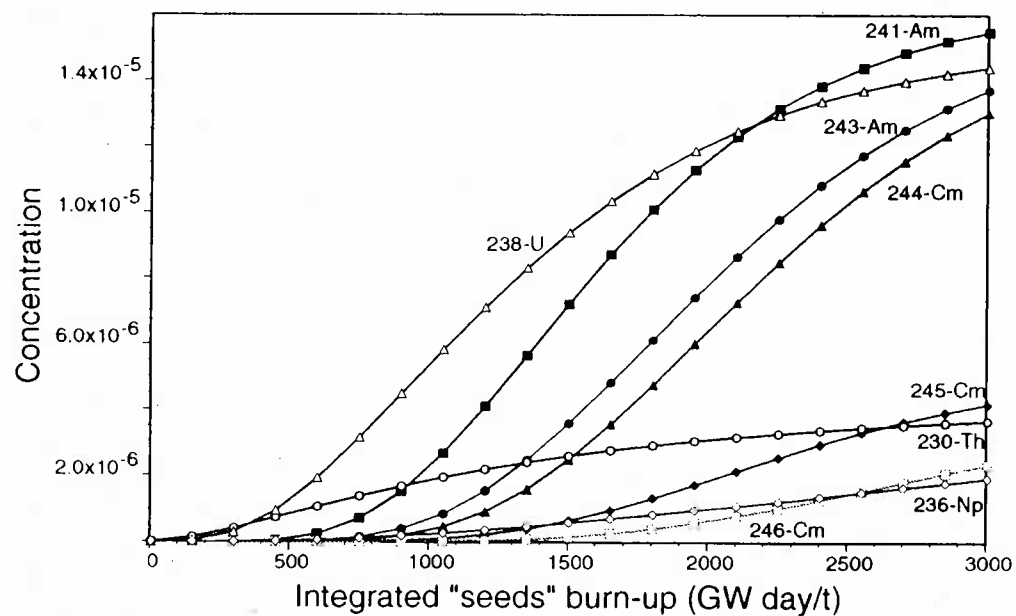
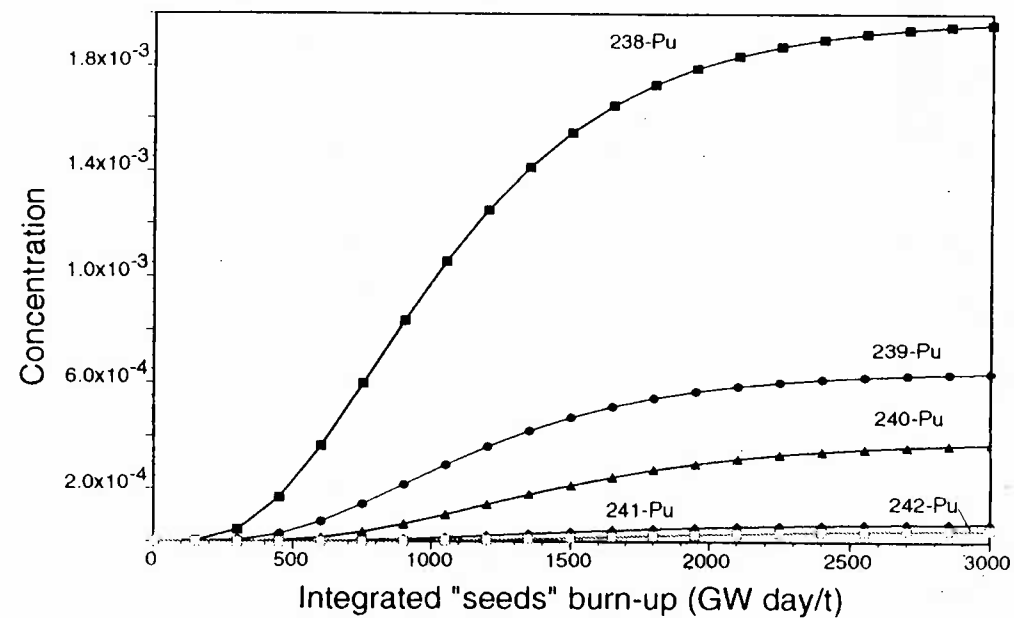
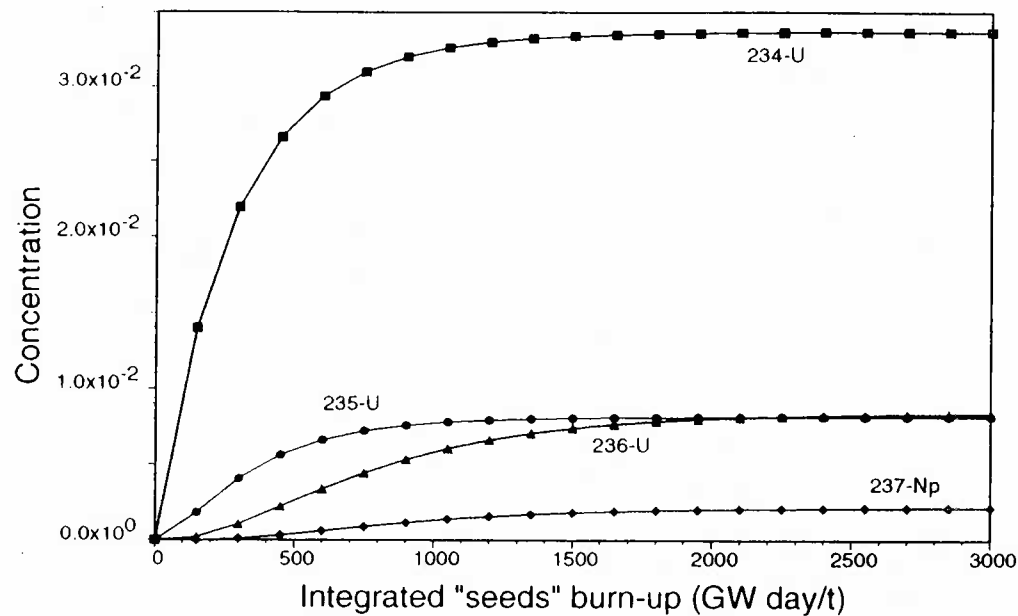
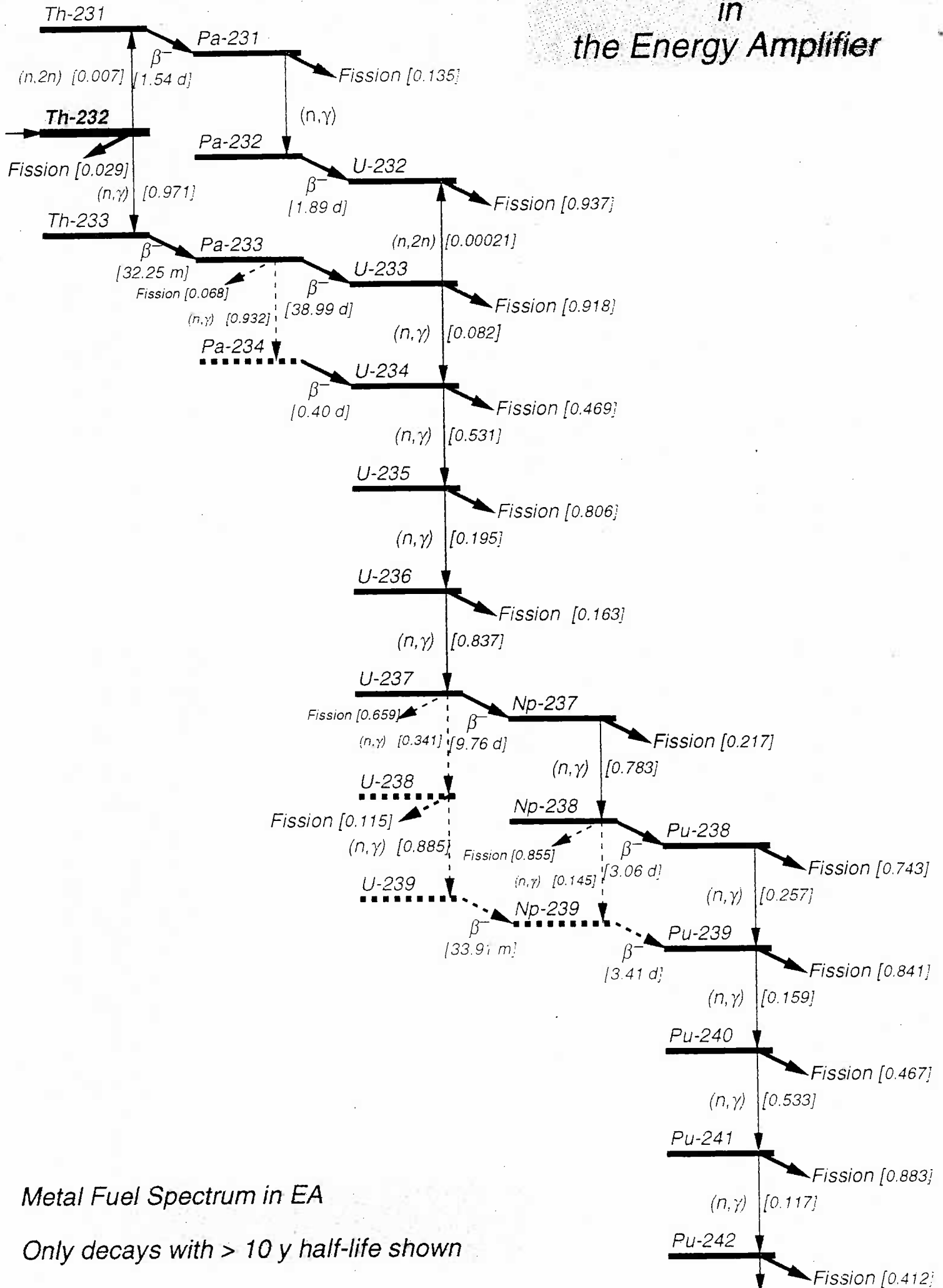


Figure 2.8b

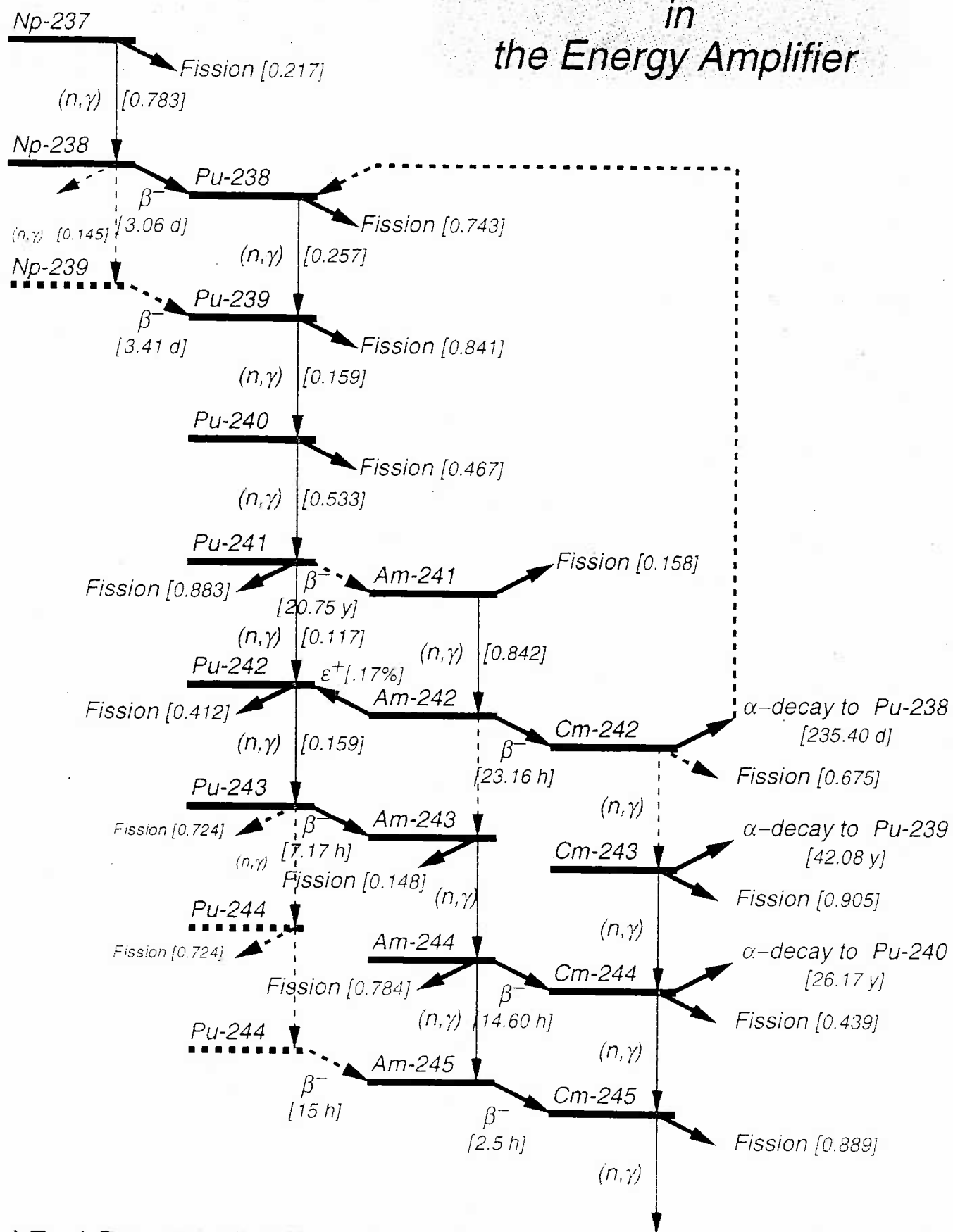
Thorium Cycle 26 in the Energy Amplifier



Metal Fuel Spectrum in EA

Only decays with > 10 y half-life shown

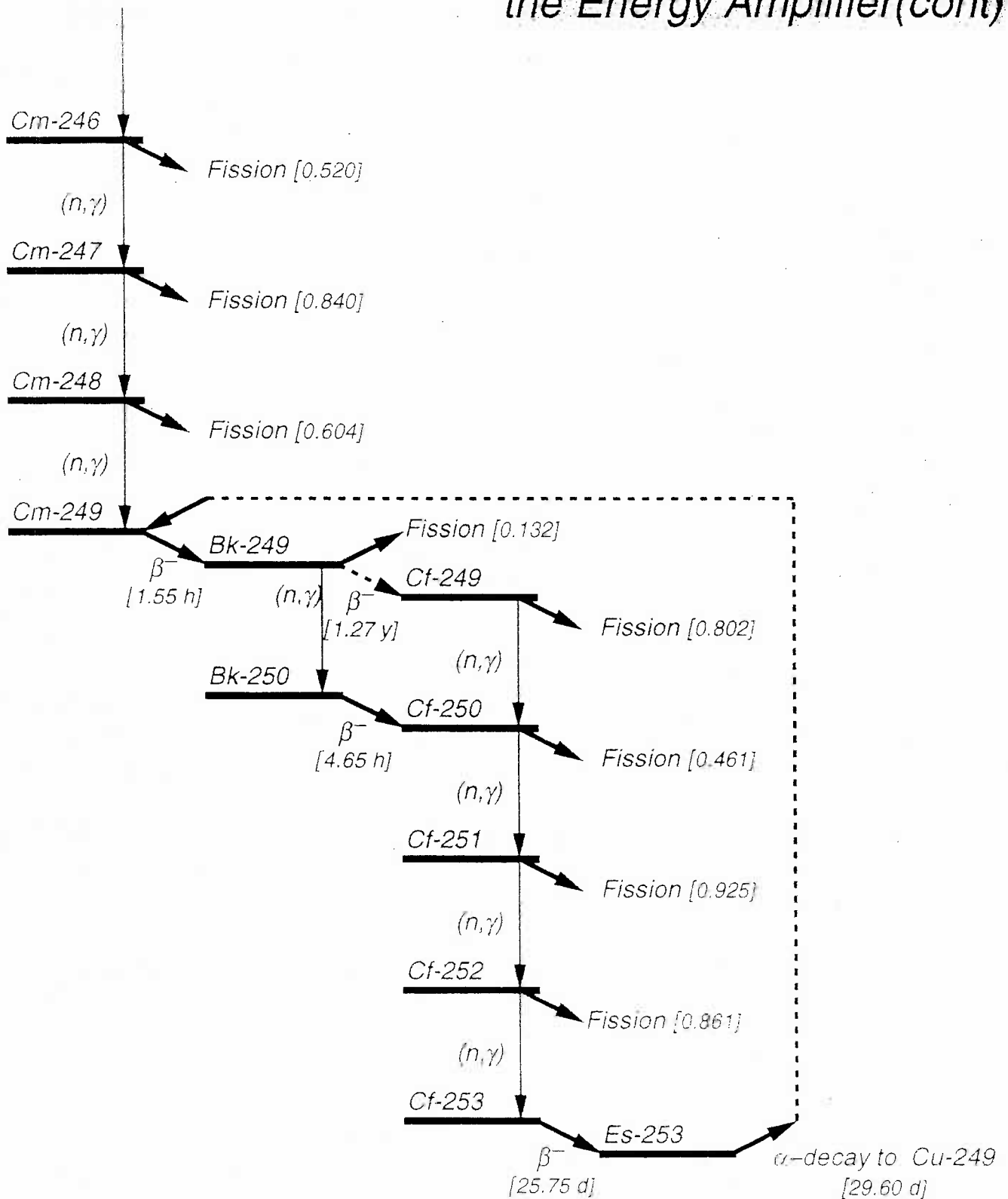
Actinide Burning in the Energy Amplifier



Metal Fuel Spectrum in EA

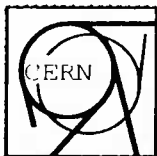
Only decays with > 10 y half-life shown

Actinide Burning 28 in the Energy Amplifier(cont)



Metal Fuel Spectrum in EA

Only decays with > 10 y half-life shown

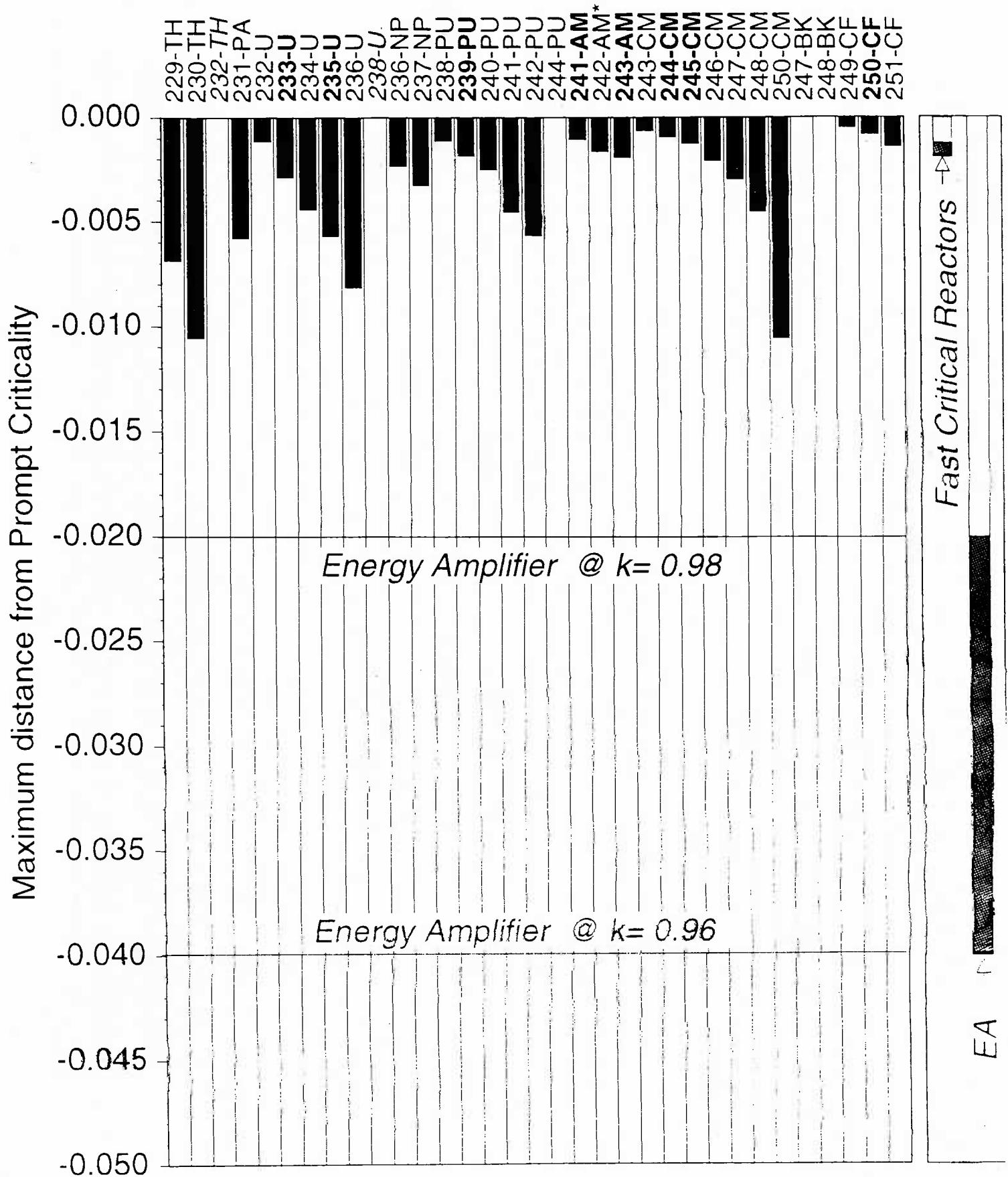


Amplificateur d'Energie: généralités

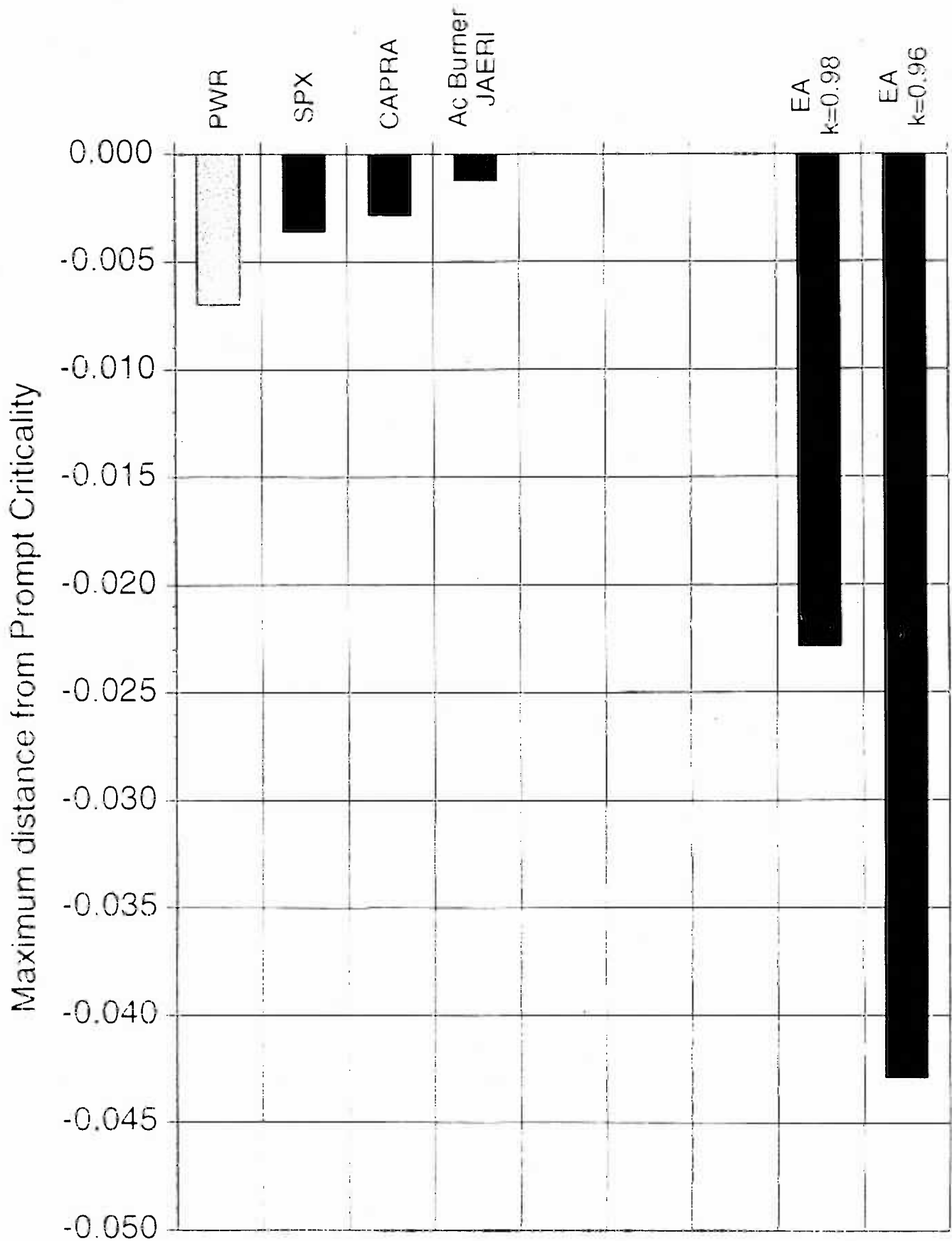
Il existe d'importantes différences entre un réacteur nucléaire (REP) et un dispositif sous-critique (AE):

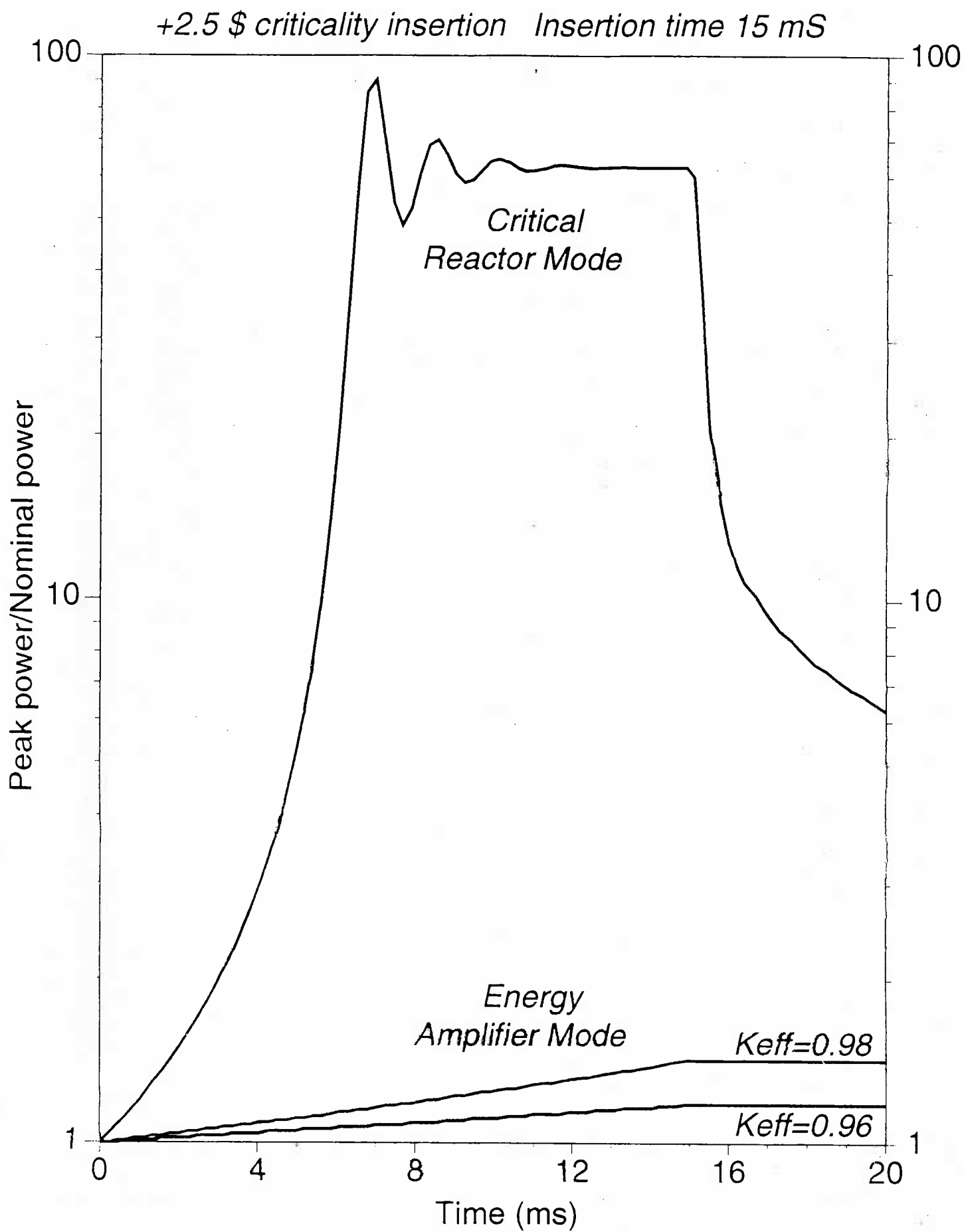
- L'AE est assuré de demeurer sous-critique. Avec quel degré de sûreté? Le choix de k est relié à la puissance "recirculée": 4.4% pour $k = 0.98$, 11% pour $k = 0.95$
- L'AE est contrôlé par une source de neutron extérieure: protons de haute énergie (1 GeV) qui remplace les neutrons "différés".
- son cycle du combustible est fermé. Les actinides sont indéfiniment recyclés. Déchets: Fragments de Fission + les pertes au retraitement ($\approx 10^{-3}$ actuellement, $\leq 10^{-4}$ espérés). Leur radio-toxicité est grande, mais de bien plus courte période:
 - comparable à la fusion (radio-toxicité du 3-H identique à 233-U dans AE)
 - atteint le niveau de radio-toxicité des cendres de charbon en ≤ 500 ans
- Permet la surgénération intégrale: 1 t. de Th naturel produit autant d'énergie que 150 t. d'U naturel dans un REP. Le "rêve" des surgénérateurs + une source d'énergie pratiquement illimitée.

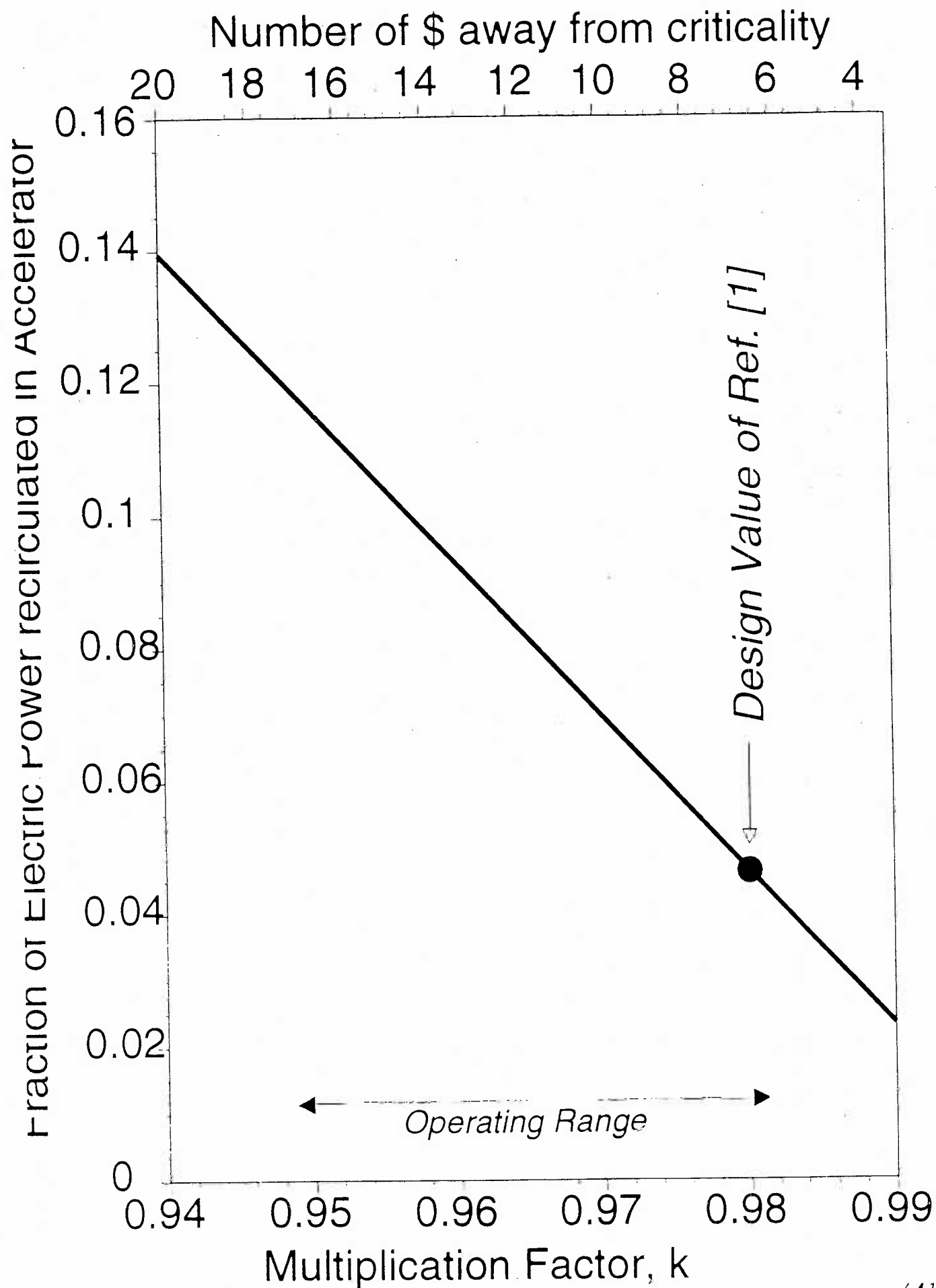
Allowed operational Safety Margin

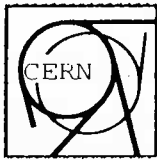


Allowed Operational Safety Margin



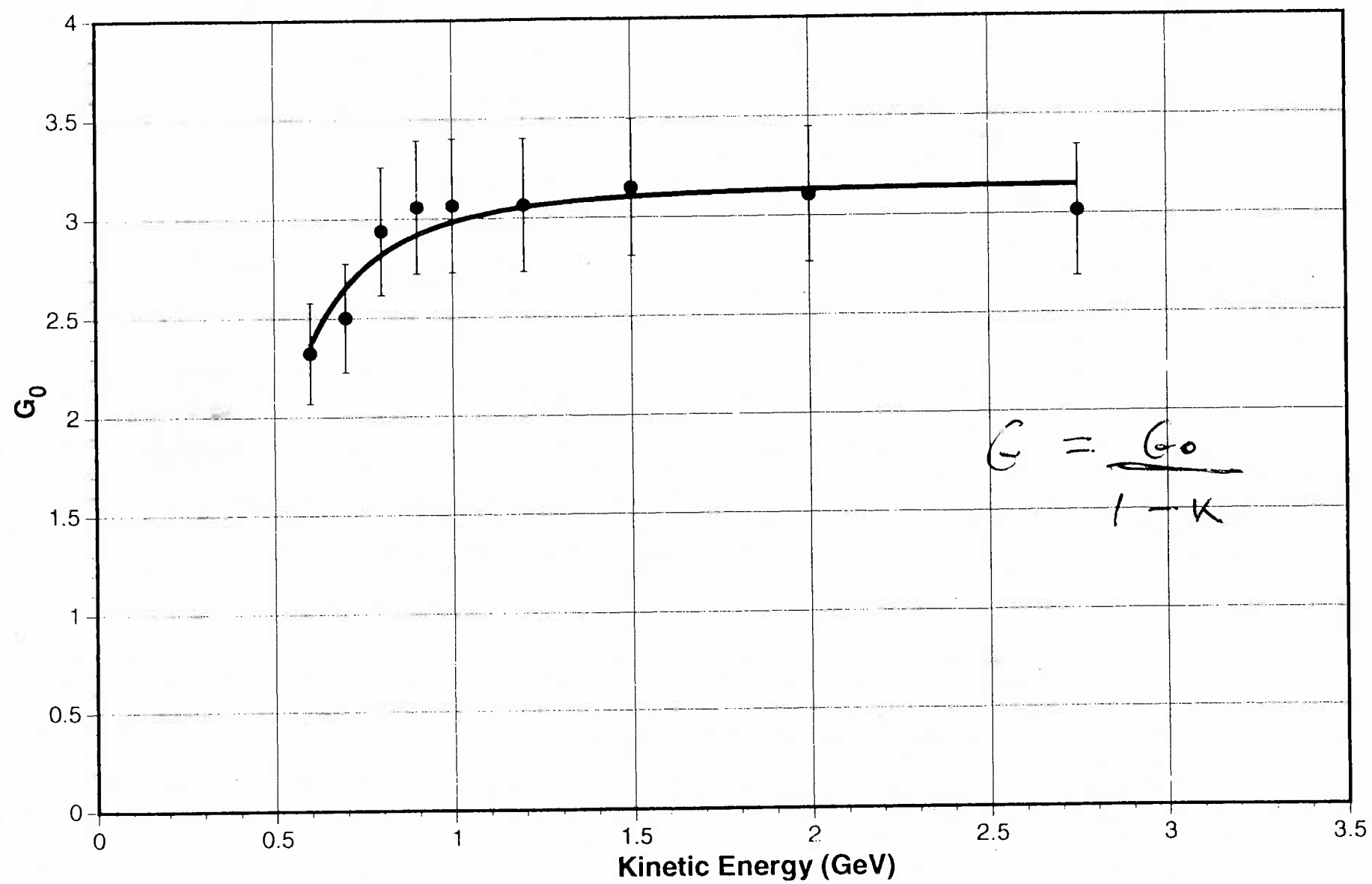


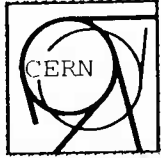




Lignes Directrices: Généralités

- Le but principal de l'AE est de produire de la chaleur à haute température de façon économiquement "compétitive". Ceci implique une puissance unitaire P de l'ordre de $1 \div 2$ GWatts.
- L'énergie cinétique des protons du faisceau peut être relativement modeste. Le gain est le produit d'un gain de spallation G_0 et d'un gain de fission $1/(1-k)$. G_0 arrive à saturation déjà pour une énergie des protons de 1 GeV (cible de plomb).
- Le courant maximum i_{beam} que l'on sait manipuler dans l'état présent de la technologie (cible, fenêtres etc.) est $\approx 10 \div 20$ mA. Donc pour produire P , $G \approx 100$ @ 1 GeV and $G \approx 50$ @ 2 GeV
- Les neutrons rapides plutôt que thermiques entraînent de plus:
 - que la densité de puissance peut être d' un ordre de grandeur plus élevée : moins de captures gênantes dans la chaîne de régénération ($\Delta k \leq 0.01$ pour 60W/gr).
 - Une distribution radiale de combustion beaucoup plus uniforme
 - Un burn-up plus grand à cause de l'empoisonnement plus petit par les PF, c.a.d. ≥ 120 GW jour /t
 - Une plus grande production de ^{231}Pa et ^{232}U , pour "dénaturer" le ^{233}U

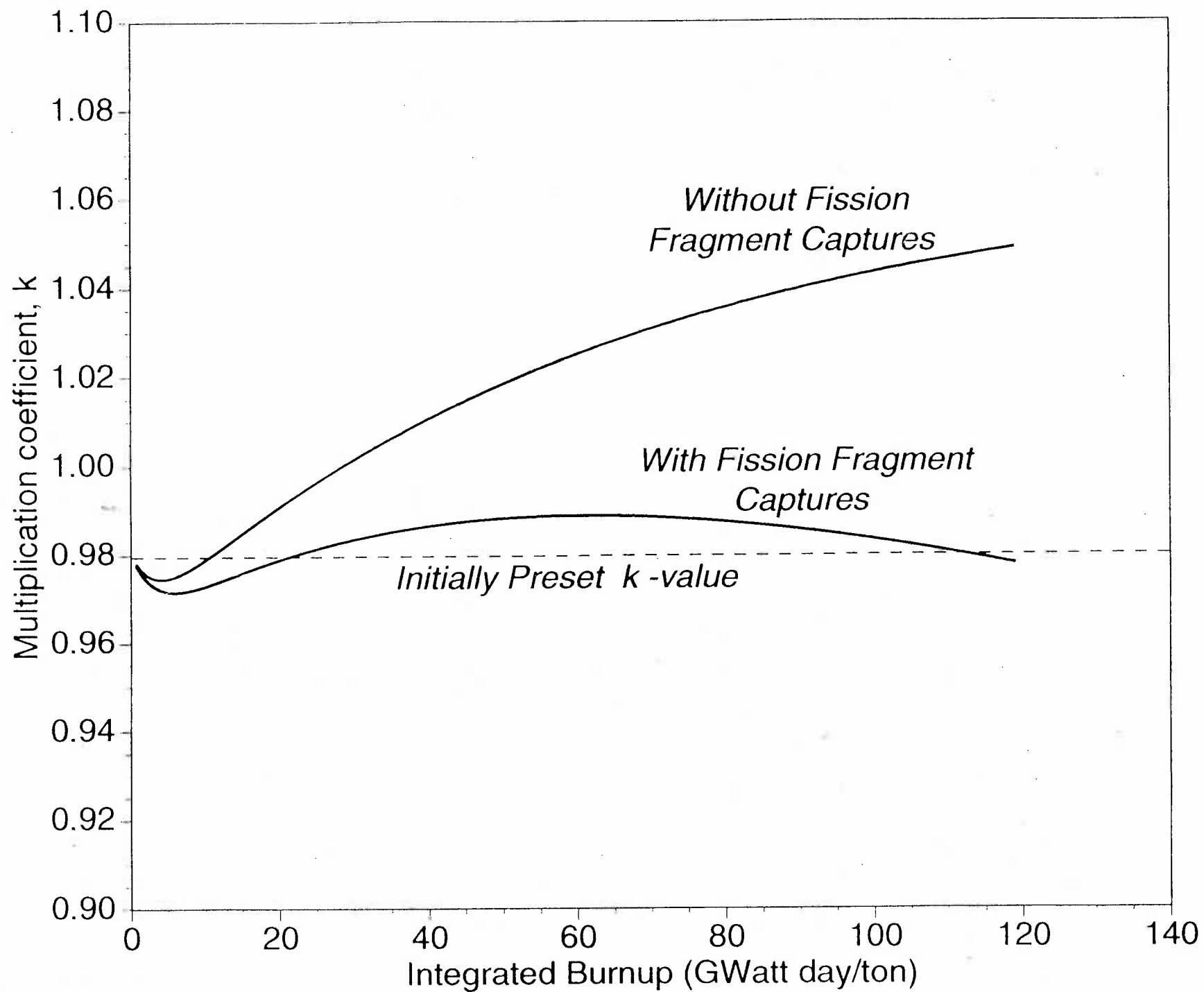
G_0 vs. Beam kinetic energy



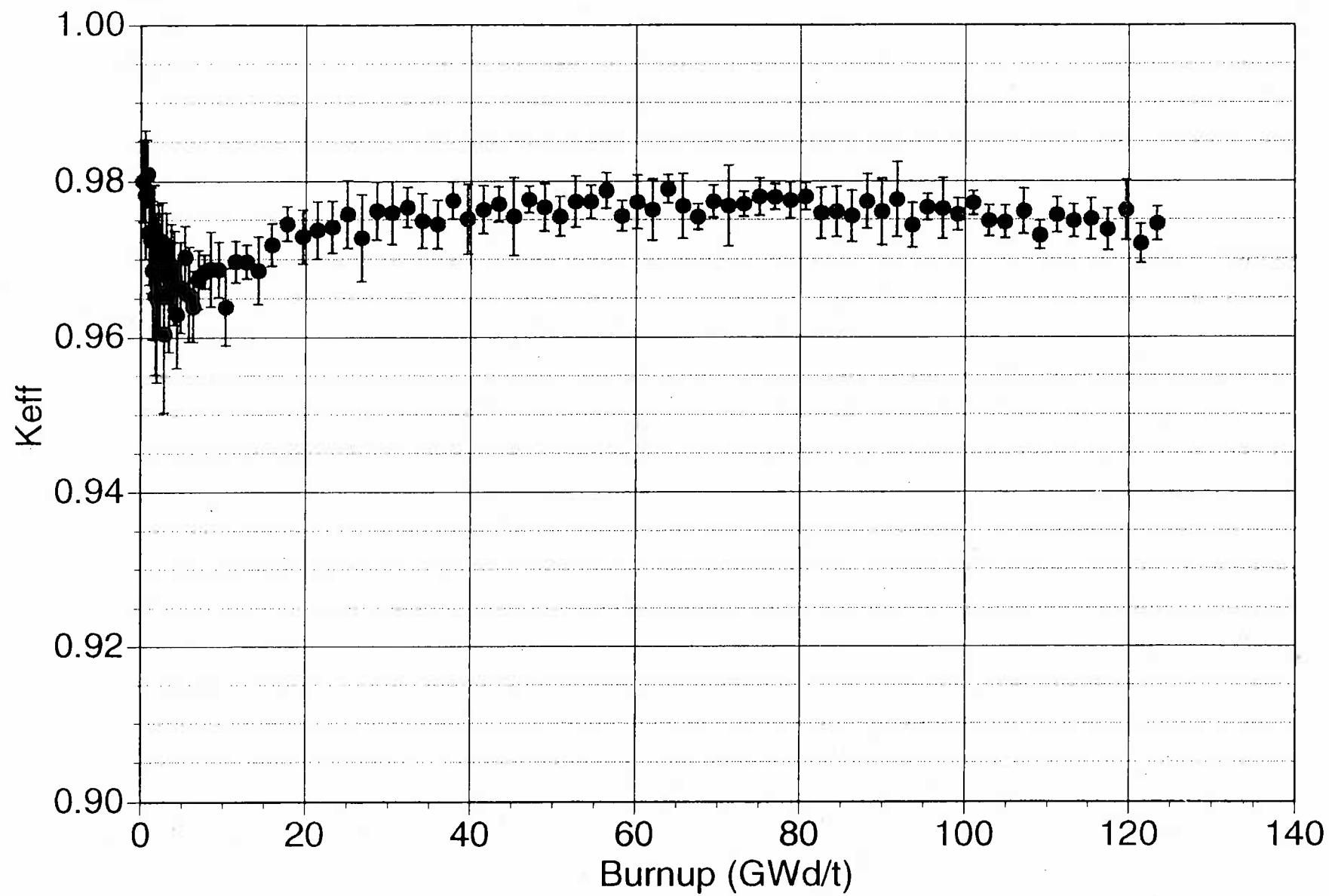
"Burn-ups" étendus avec k constant

Pour opérer longtemps sans barres de contrôle, la valeur de k dans un AE doit être intrinsèquement constante. Ceci est obtenu par une méthode de compensation:

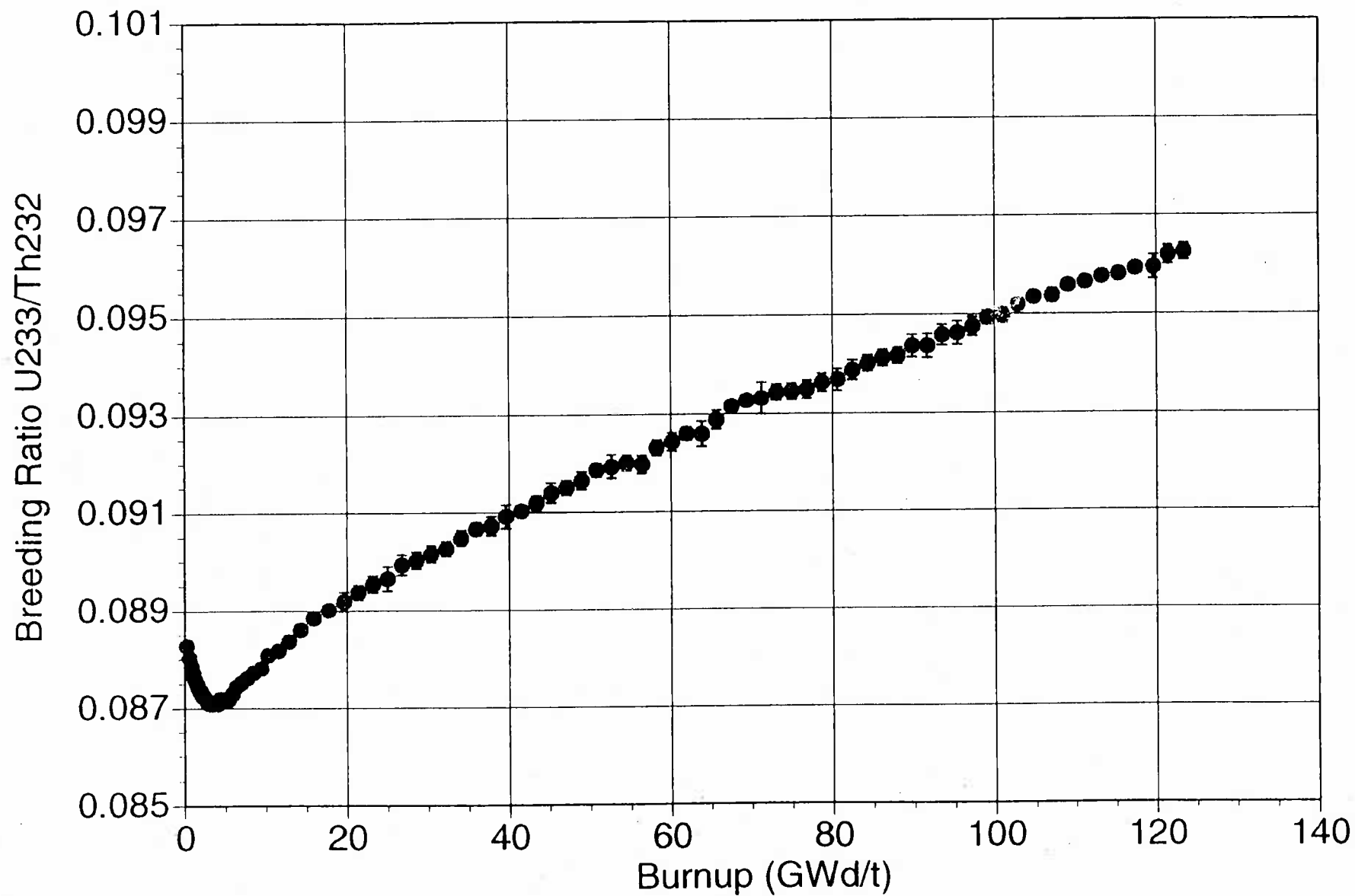
- la perte (linéaire) de réactivité due à l'accumulation des fragments de fission (≈ 0.06 après 100 GW j/t) est compensée avec une concentration fissile initiale inférieure à l'équilibre de breeding ($\approx -10\%$). En mode "énergie" (Th + ^{233}U + ..) les paramètres clés sont:
 - la concentration initiale en ^{233}U
 - la masse totale de combustible (buckling)
- En mode incinération (Th+Pu+...) on réalise une compensation supplémentaire entre la fraction consommée (Pu et act. sup.) et le ^{233}U produit à partir de Thorium. Les paramètres clés sont :
 - (1) la concentration Pu initiale. La totalité des résidus de la charge précédente est toujours complètement utilisée
 - (2) la masse du combustible (buckling) et
 - (3) la quantité de Thorium mélangée
- On obtient régulièrement de cette façon une très grande constance de k ($|\Delta k| \leq 0.01$) pour des burn-ups bien au-delà de 100 GW j/t et pour de nombreux cycles successifs.

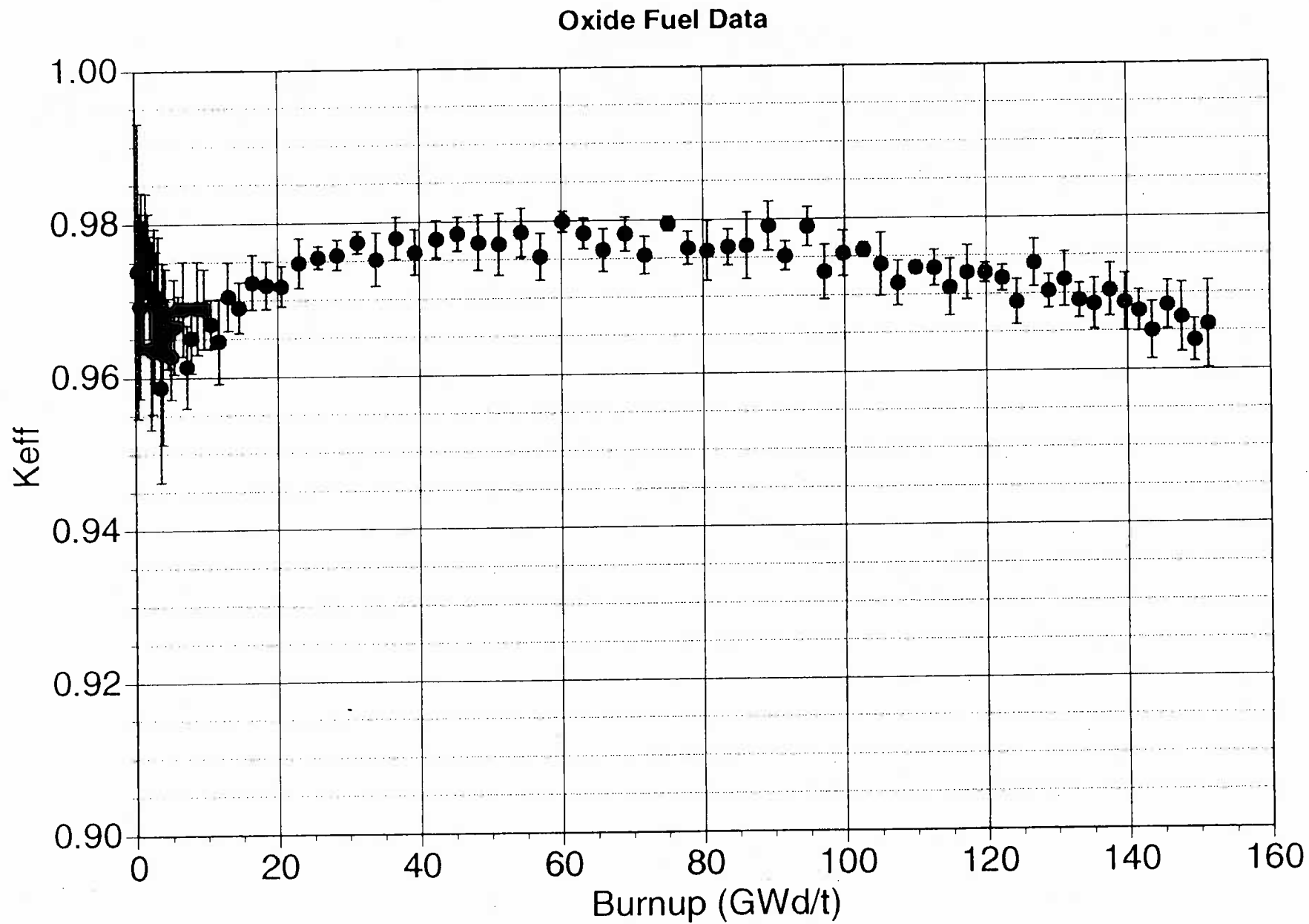


Metal Fuel Data (Th-U fuel)

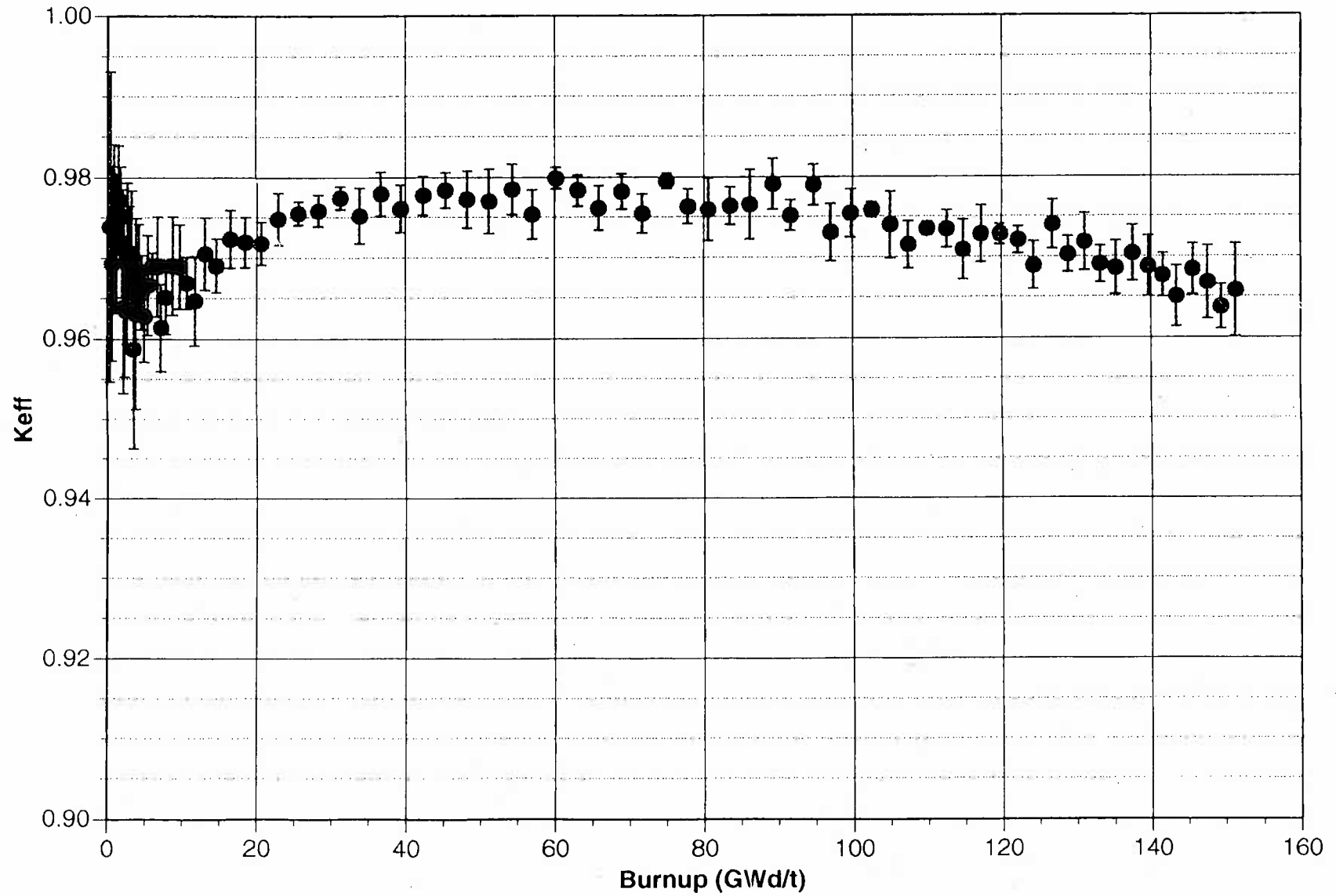


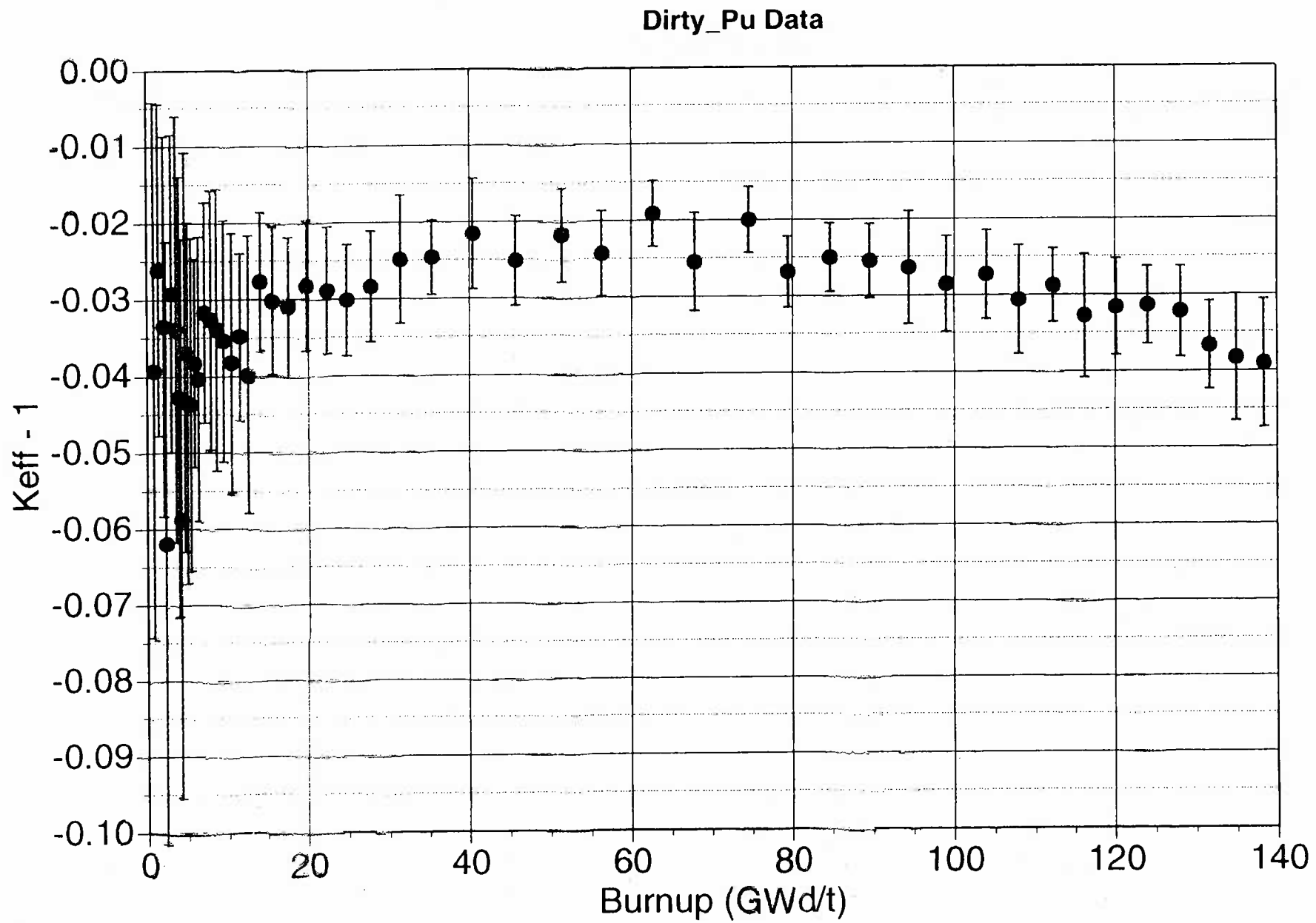
Metal Fuel Data (Th-U fuel)

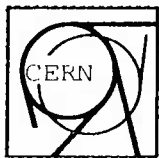




Oxide Fuel Data: reload



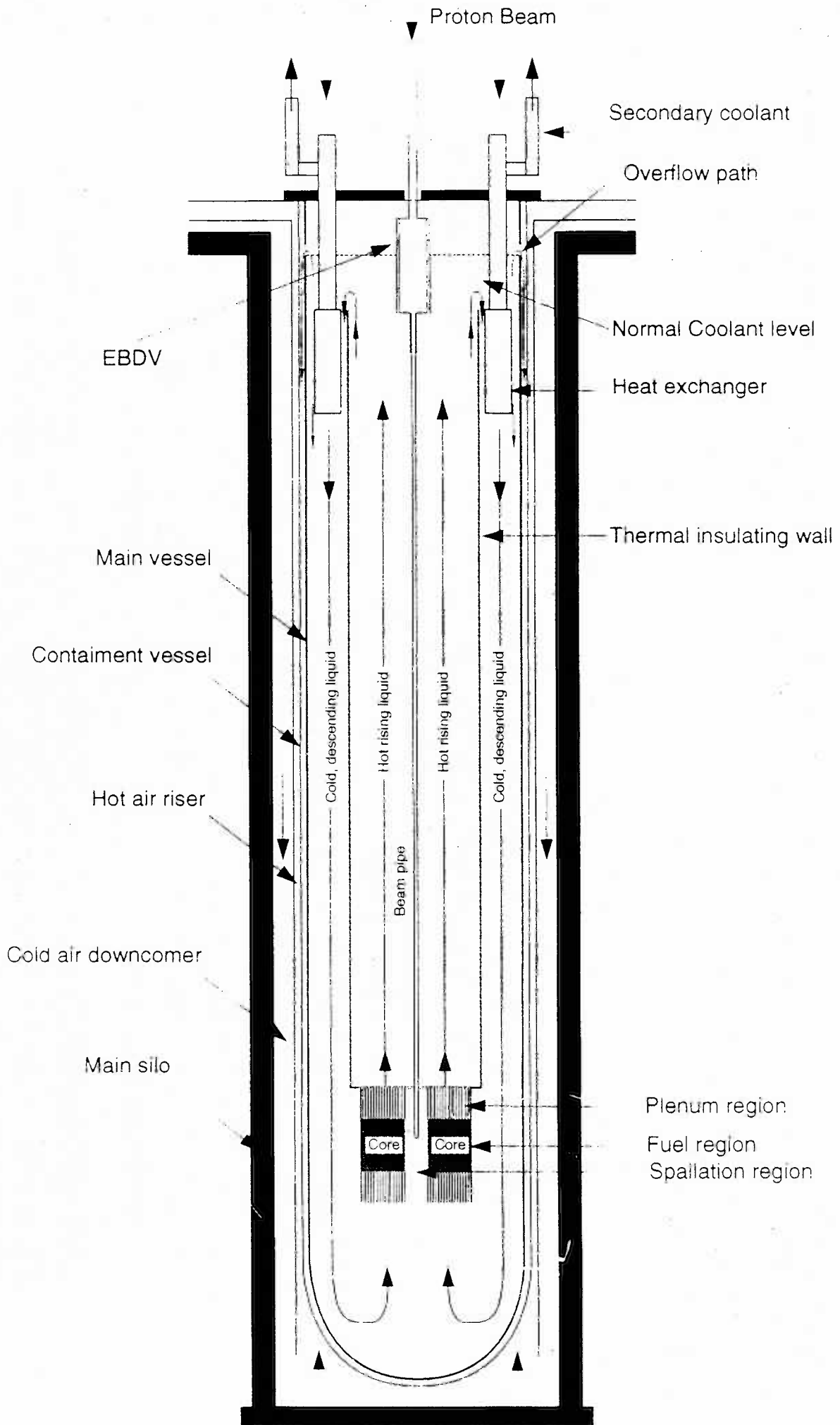




Lignes Directrices: Sûreté

La sécurité est d'une importance primordiale. Outre l'opération sous- critique, nous avons choisi une option plomb fondu et refroidissement par convection:

- **Pas de chimie en ligne, burn-up maximal sans intervention (150 GW J/T)**
- **Fluide caloporteur monophasé (Pb) avec coefficient de vide positif et point d'ébullition élevé (1730 °C). $\Delta k < 0$ si l'on vidange totalement ou partiellement le caloporteur et lors de déformations sévères du combustible.**
- **l'opération exclut la fusion du coeur même pour une TLOP (perte complète de puissance) indéfinie. Le refroidissement par convection transfère la chaleur de décroissance depuis le coeur jusqu'aux parois où elle est dissipée par rayonnement Stefan-Boltzmann ($\approx 4 \text{ W/cm}^2$) et simple ventilation.**
- **Les assemblages de combustibles suivent la technologie éprouvée utilisée dans les réacteurs. Le combustible est soit Mélange Oxydes soit Alliage Métal.**



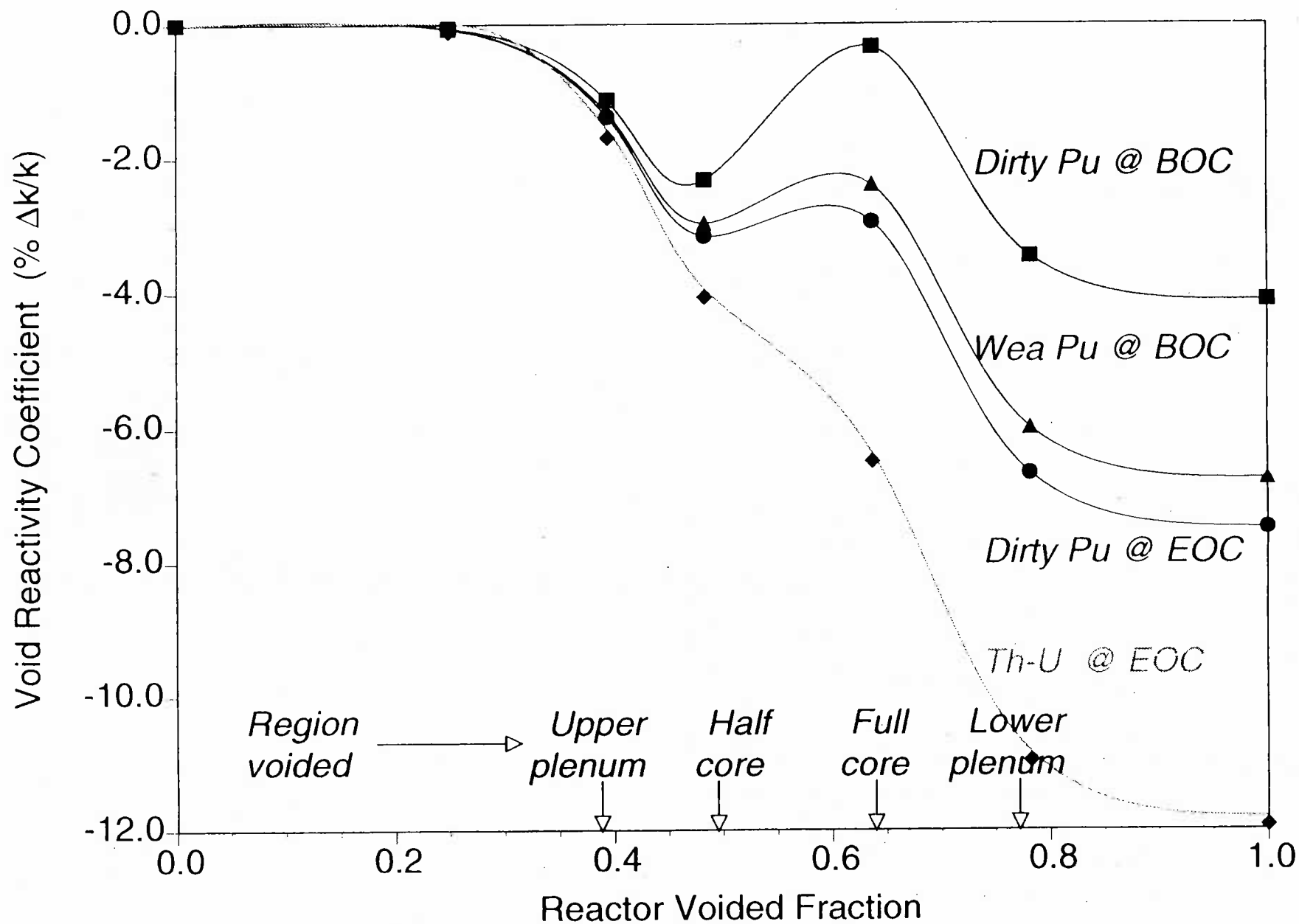
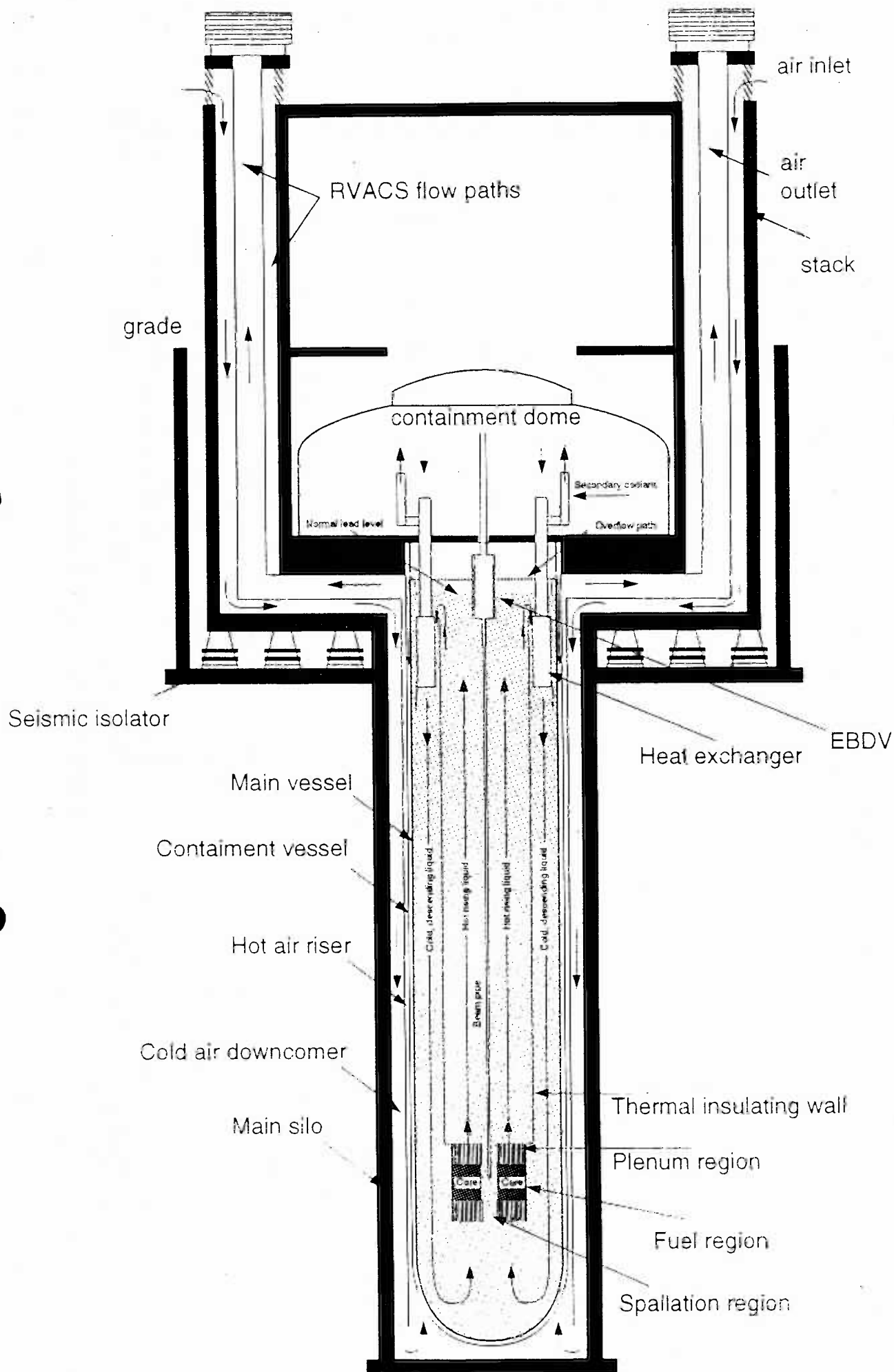
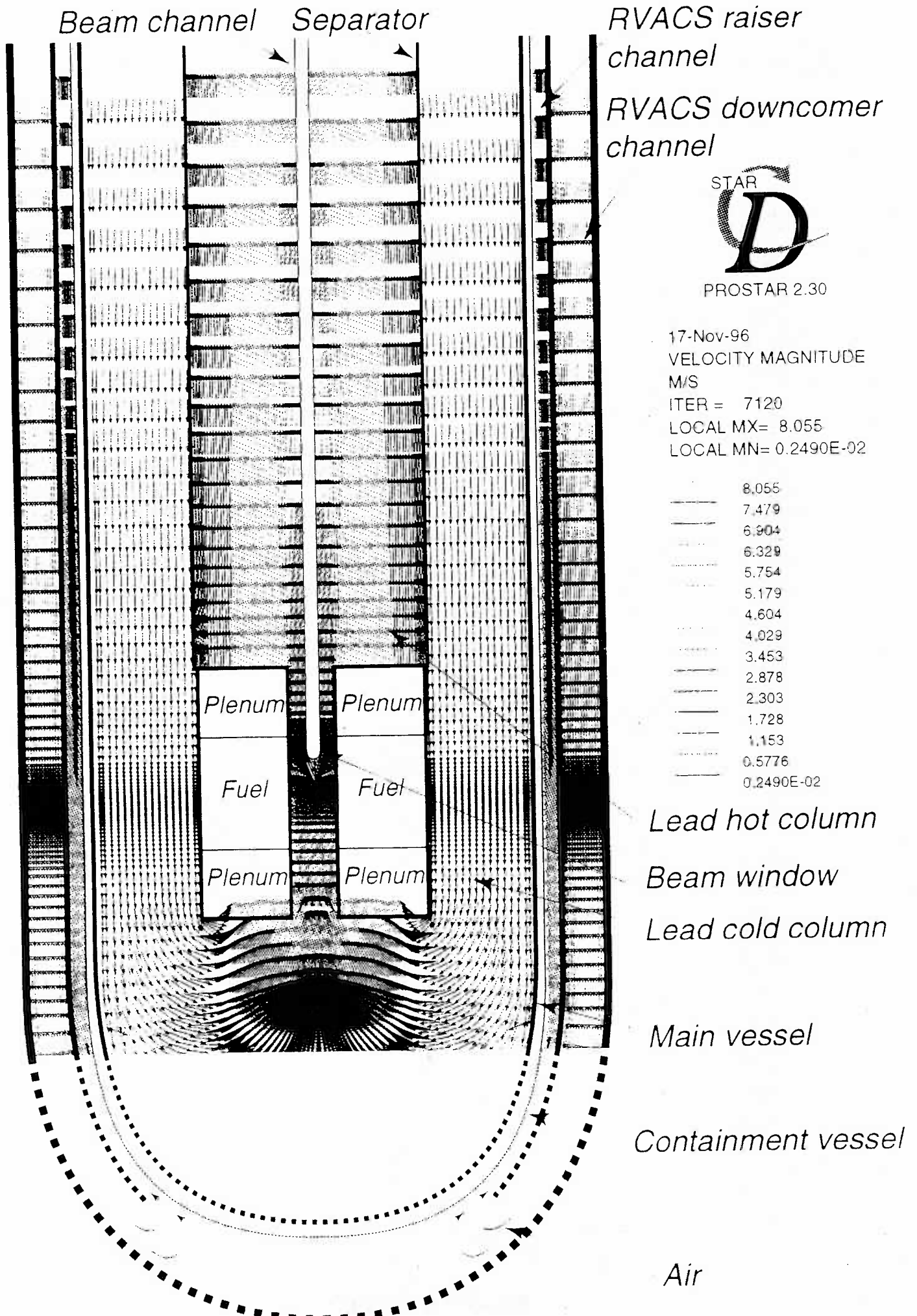
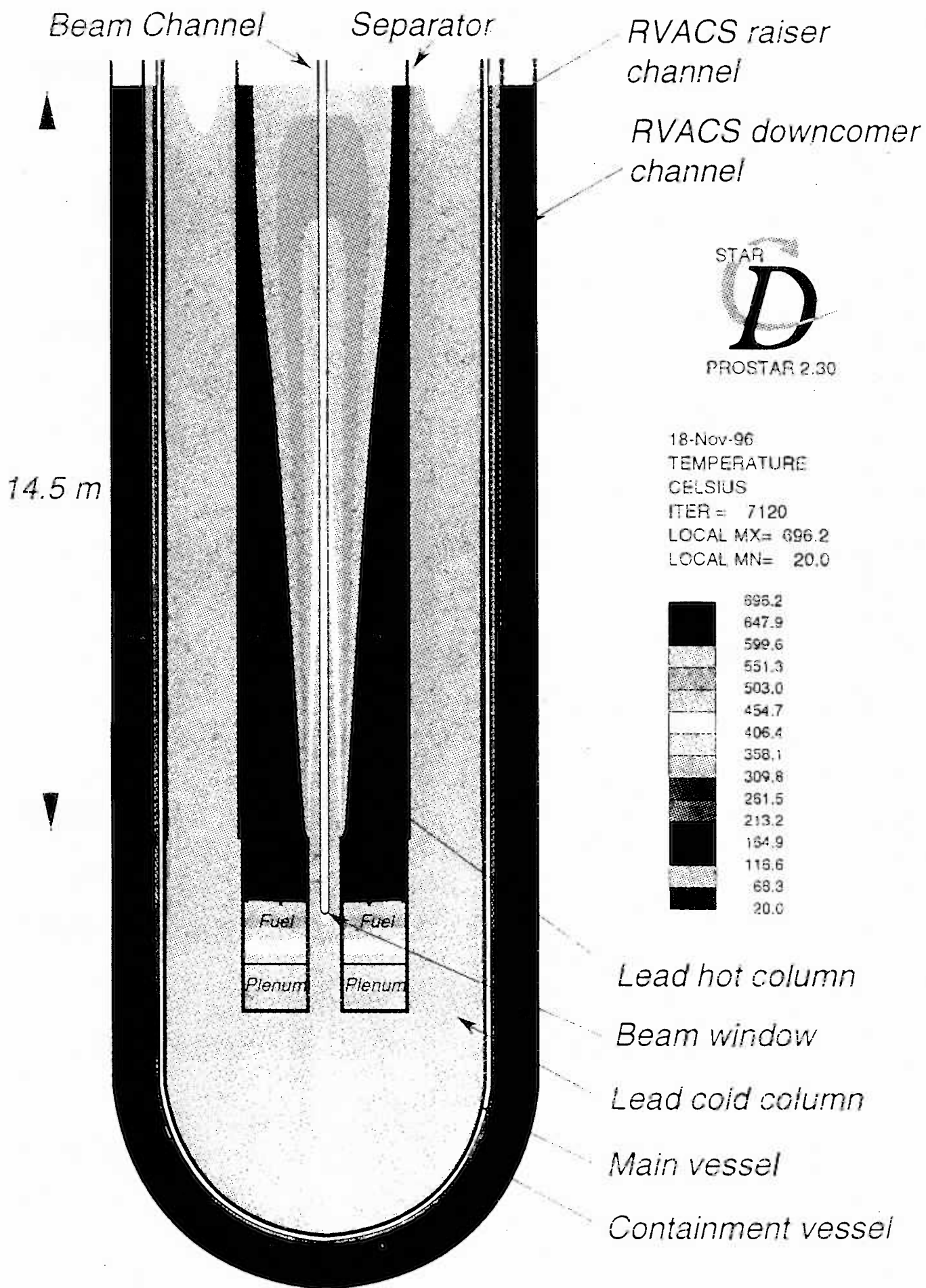


Figure 3.2



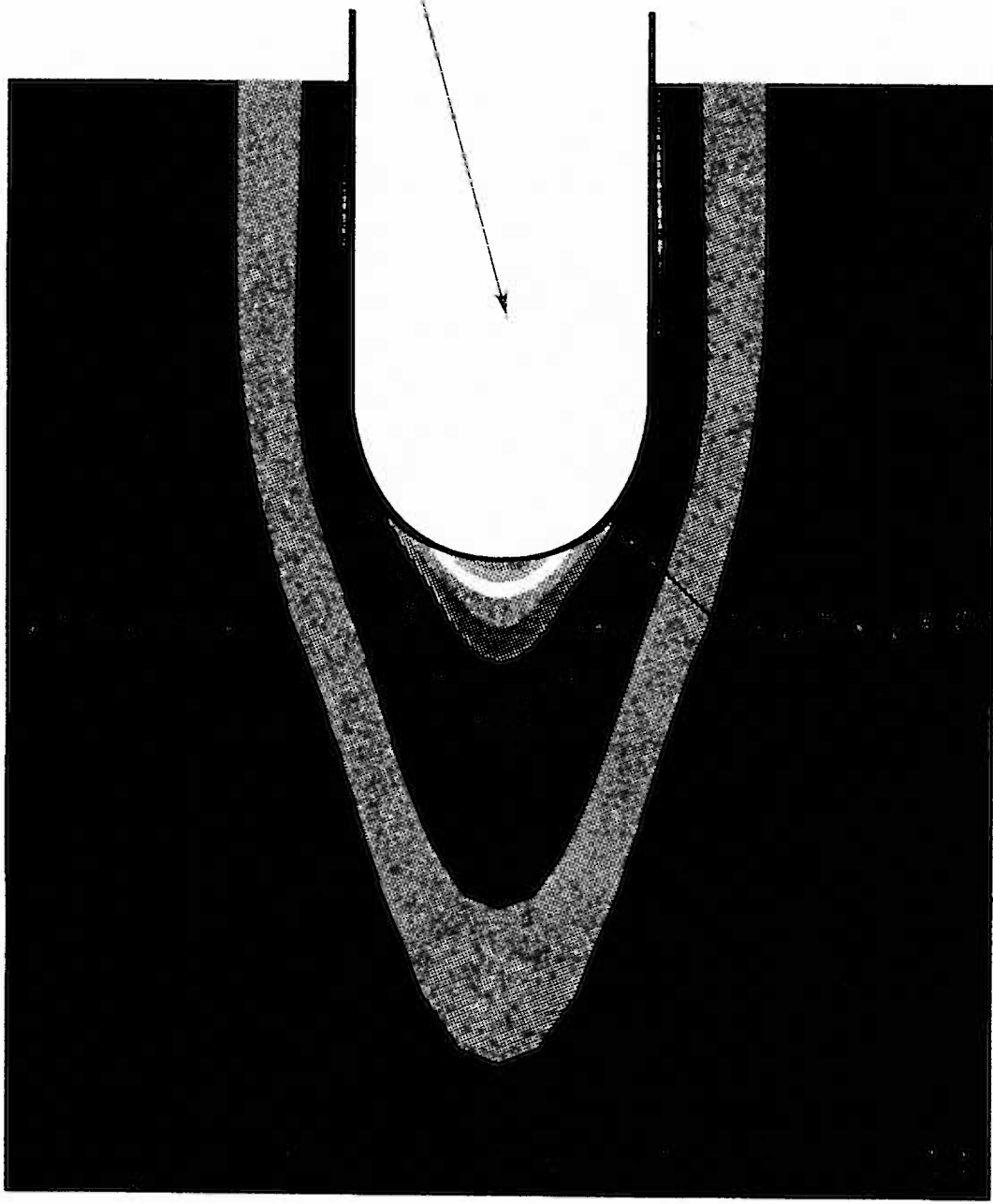
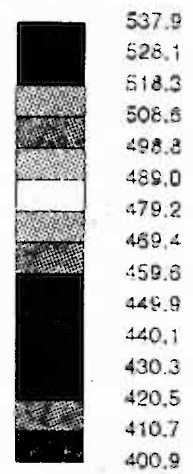






Beam channel

18-Nov-96
 TEMPERATURE
 CELSIUS
 ITER = 7120
 LOCAL MX = 537.9
 LOCAL MN = 400.9



Beam window

Map of the energy deposit of a 1 GeV proton into the FEA target

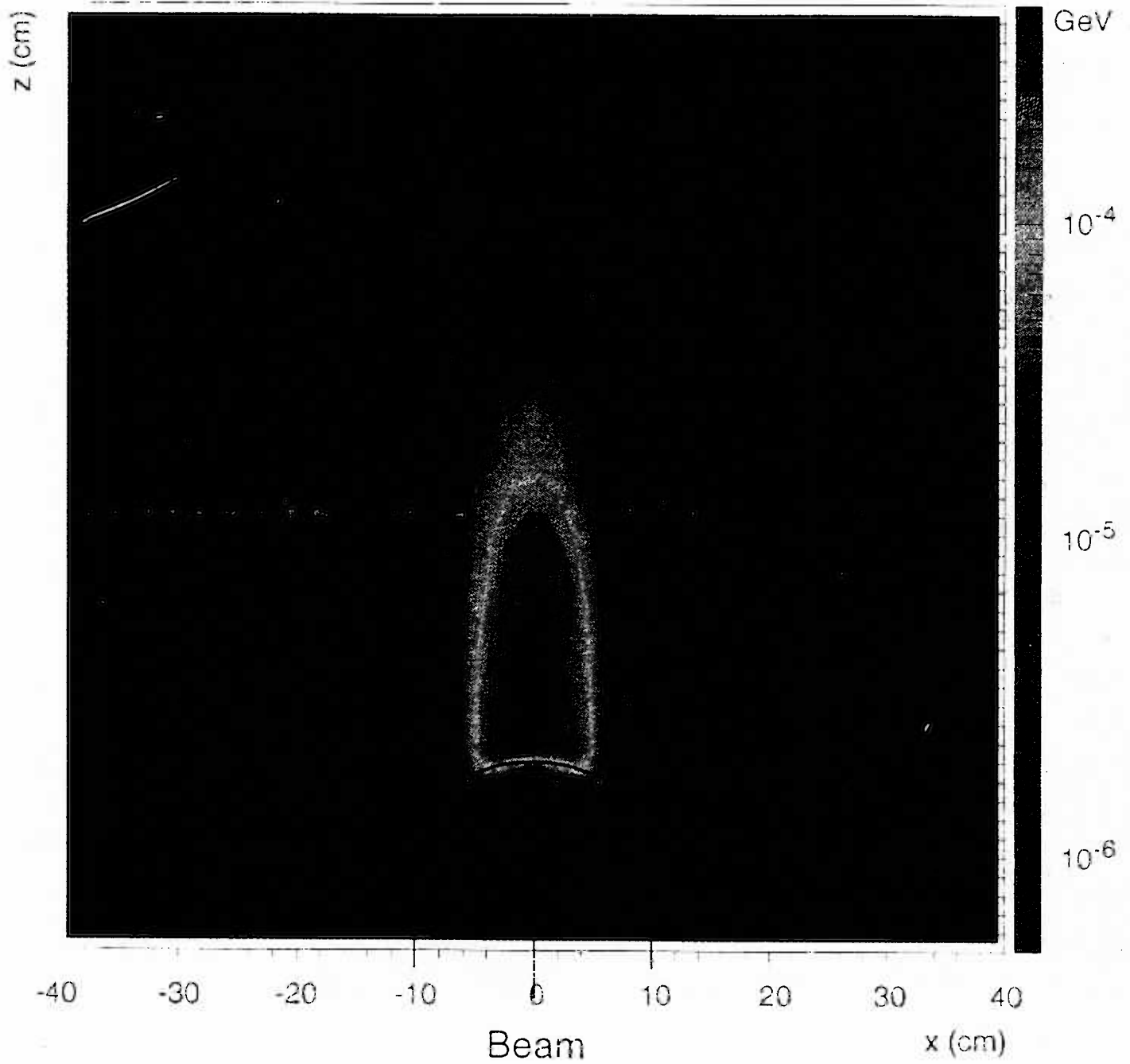
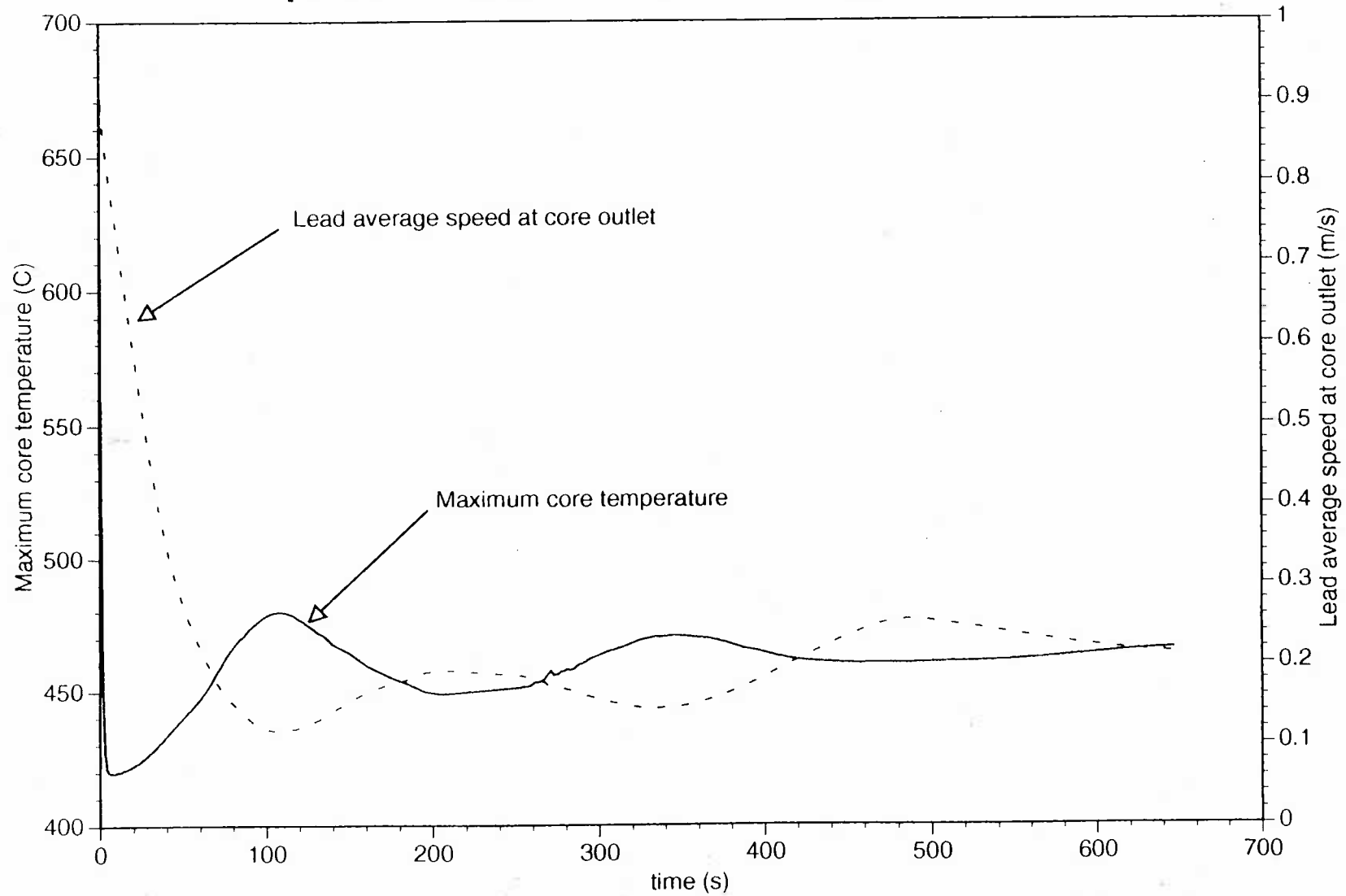
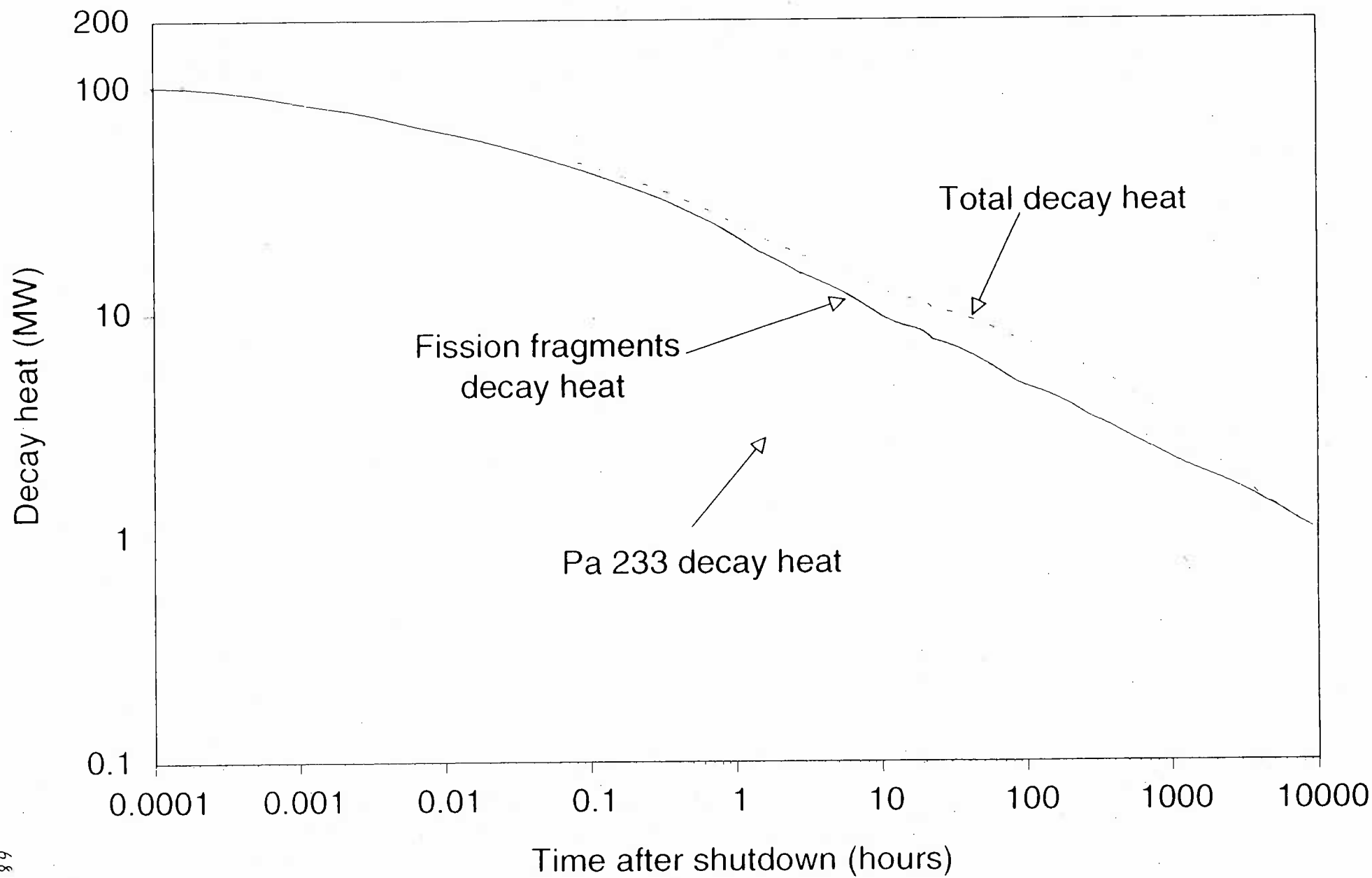


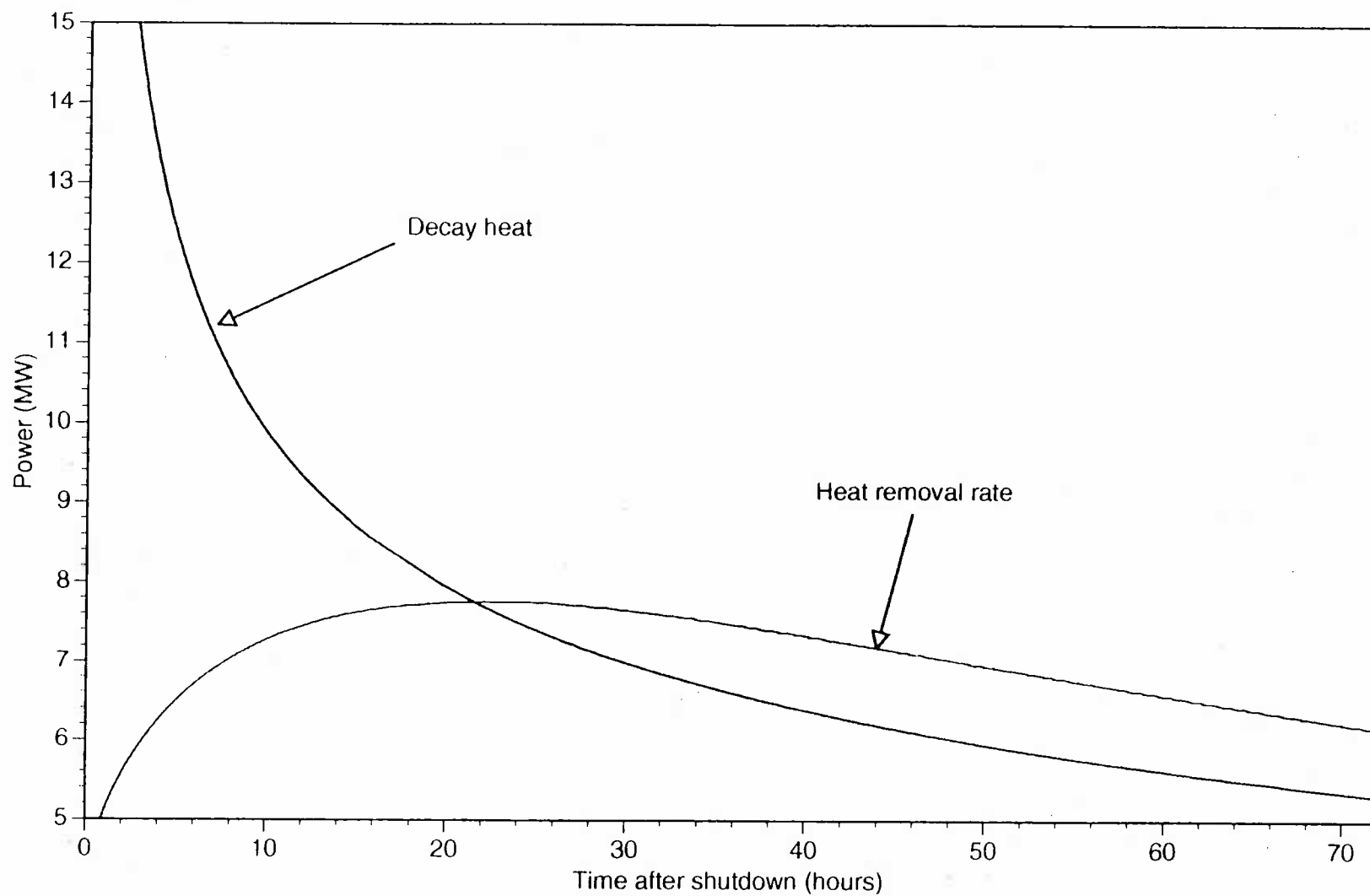
Figure 4

**Behaviour of the Lead average speed at the core outlet and
the maximum Lead temperature in the core of the Energy
Amplifier in the first 10 minutes of a TLOP accident**

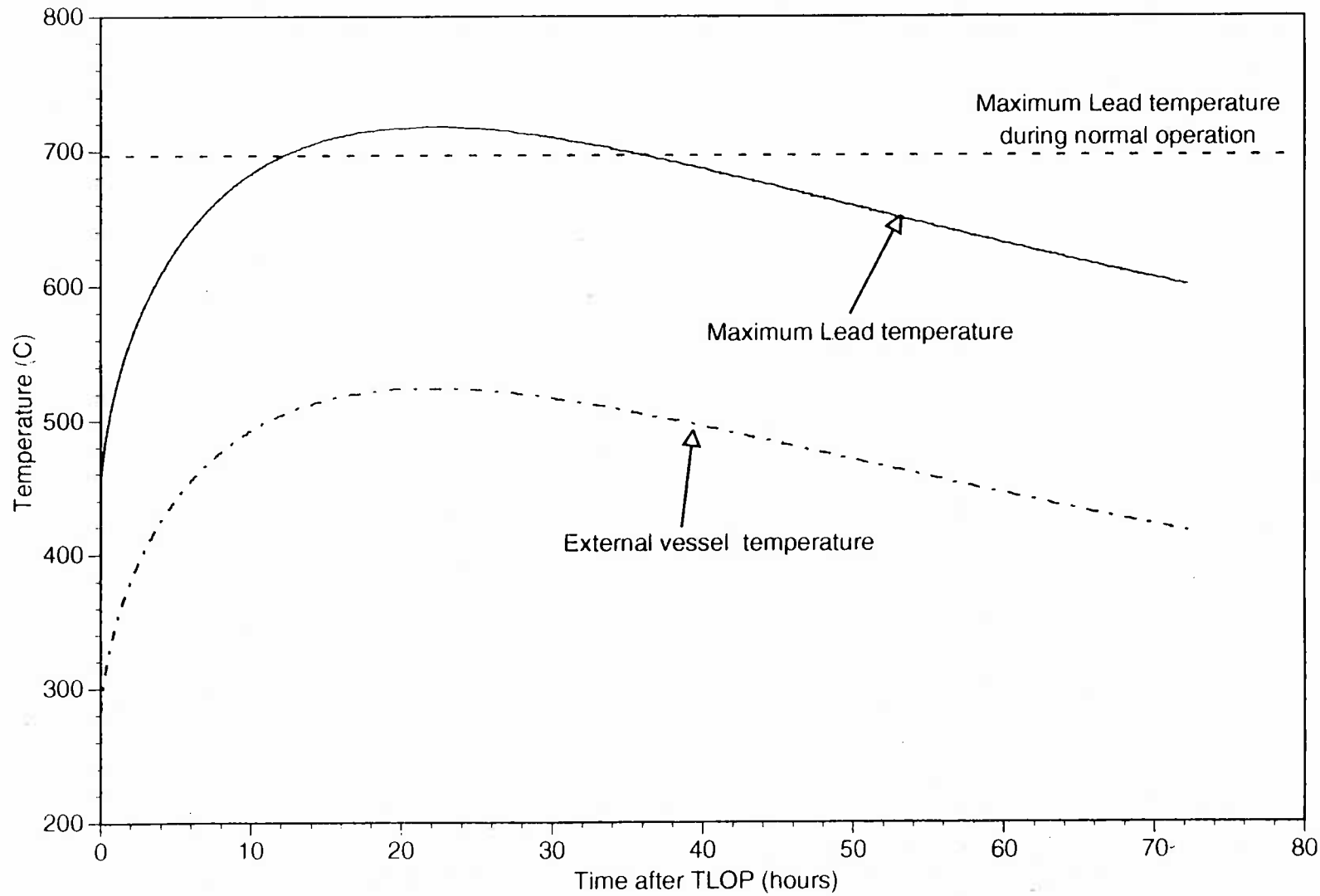


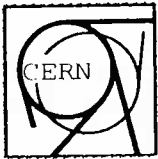


Decay heat generation and heat removal rate vs. time in the Energy Amplifier during a TLOP accident



Evolution of the external vessel and maximum Lead temperatures in the Energy Amplifier during a TLOP accident





Sûreté (suite)

- En dernier recours, un courant trop élevé et une évacuation insuffisante de chaleur amènent un blocage automatique du faisceau et un "scram" basé sur la dilatation naturelle.
- Blocage automatique du faisceau en cas de rupture de la fenêtre.
- Absorbant anti-sismiques

Barrières anti-prolifération permettant l'usage de cette source d'énergie dans des pays "sensibles":

- Opération en cuve scellée pendant de longues durées.
Changement de combustible par une équipe internationale.
Combustible transporté dans des récipients scellés.
- Tous les éléments transuraniens toujours à l'état de mélange (pyro-processing)
- Dénaturation du ^{233}U par la haute activité- γ provenant du ^{232}U . Pas de production appréciable de ^{239}Pu

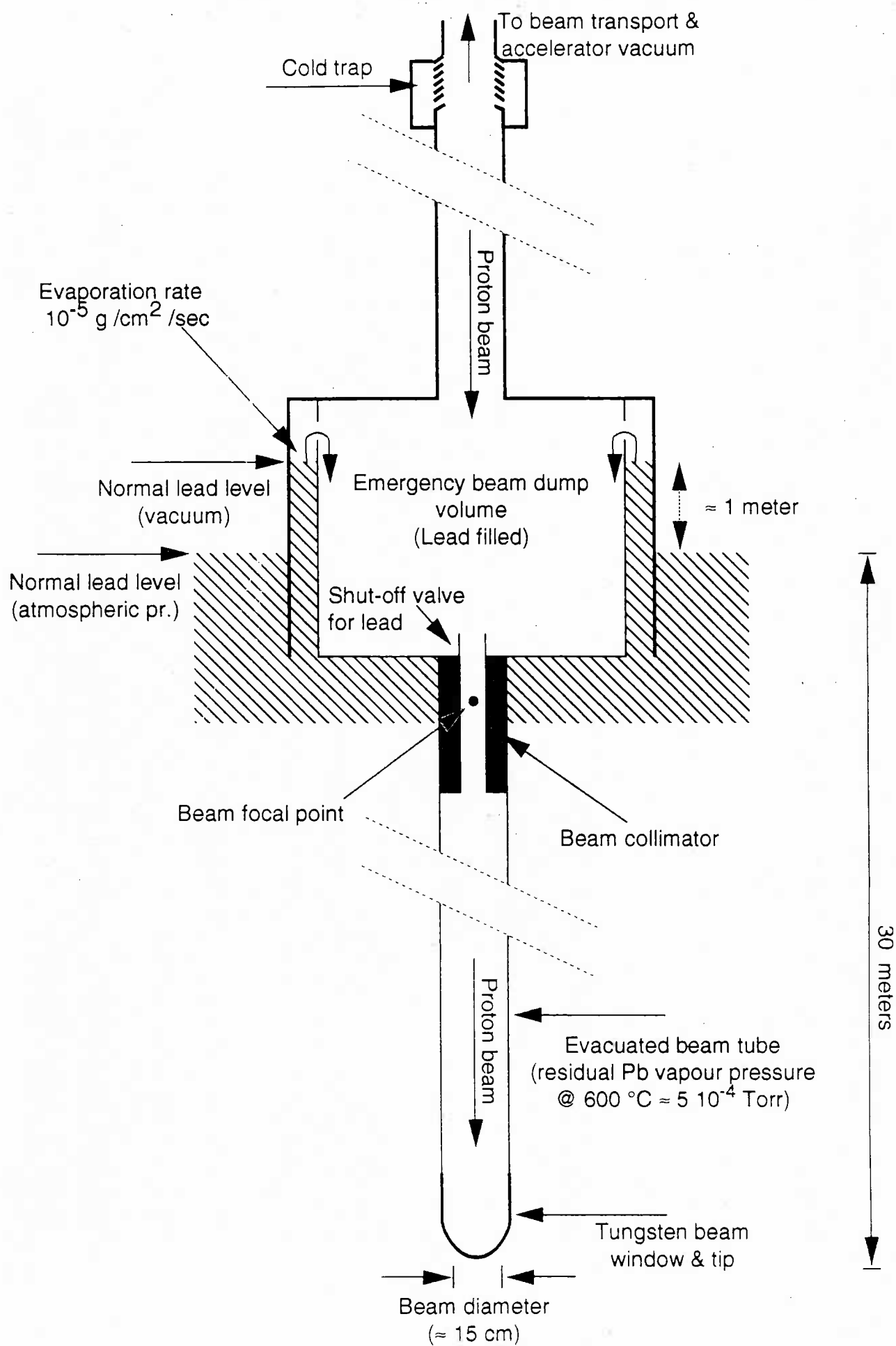
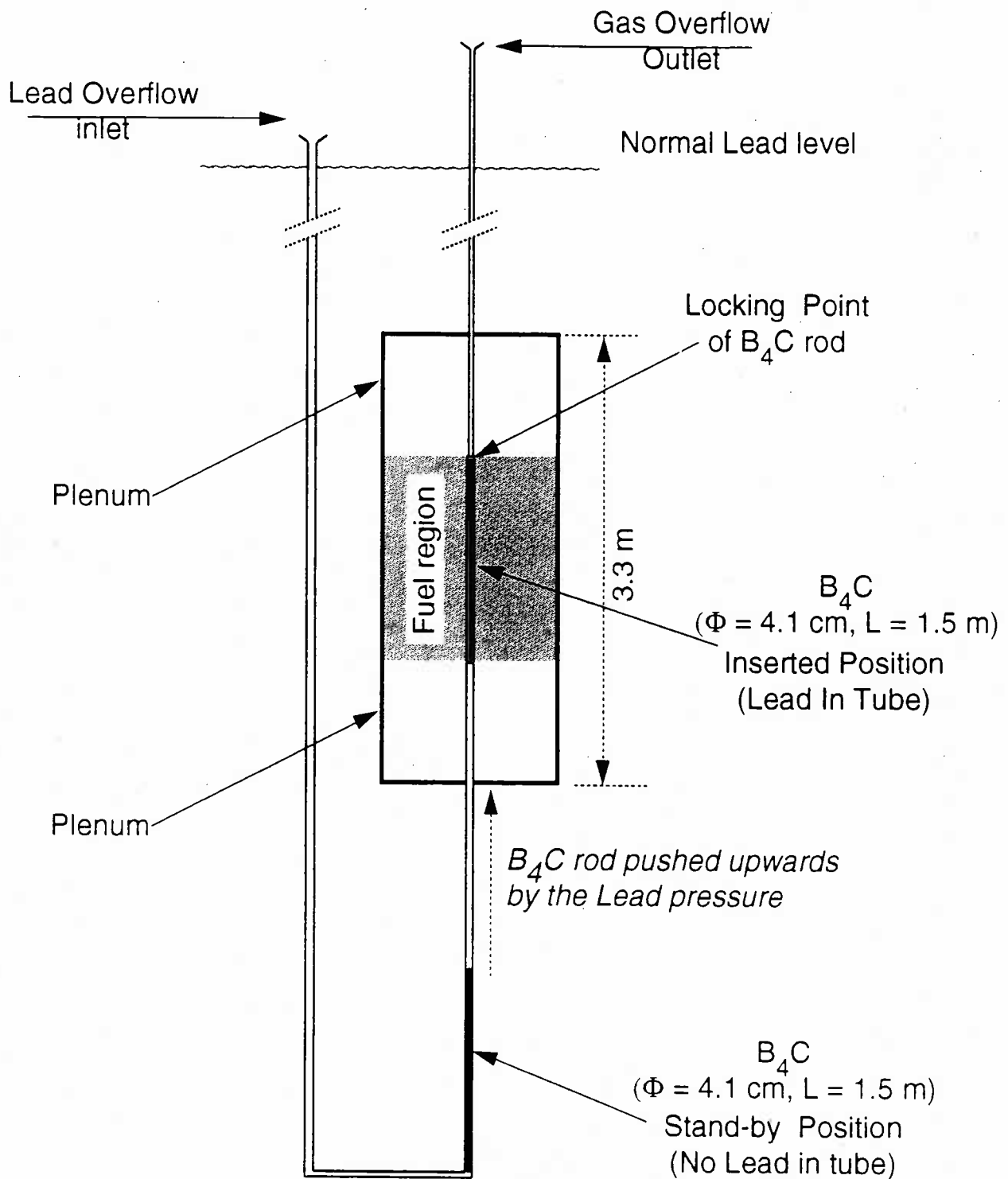


Figure 4.7



Combustible

Le combustible initial de l'AE est un mélange d'un élément fissile dans une matrice de Thorium (Uranium appauvri) .

- **Le combustible le plus propre pour la production d'énergie est le Thorium dans lequel environ 10% de ^{233}U sont continuellement régénérés. La charge initiale et du mélange asymptotique sont extrêmement semblables.**
- **L'AE peut, sans modifications brûler d'autres combustibles. Un cas particulièrement intéressant est le Pu provenant de**
 - réacteurs ordinaires
 - surplus militaires
- **On obtient une transformation de Pu $\Rightarrow \Rightarrow$ ^{233}U avec une efficacité de 70%. ^{233}U est un excellent combustible pour les REP : fermeture du cycle actinide par l'opération combinée REP-AE, et destruction presque totale du Pu. L'énergie produite dans l'AE est environ 40% de celle du REP ayant produit le Pu.**
- **Elimination des actinides mineurs (Am, Cm etc.) avec des mélanges asymptotiques acceptables . La puissance produite est quelques % mais la réduction de toxicité est considérable.**

Combustible métal ou oxyde

- Il existe une grande expérience de l'emploi de combustibles oxydes et il est donc naturel de considérer leur emploi dans l'AE. Les gaines sont en alliage ferritique /martensitique HT- 9 (bonne tenue à la corrosion dans le plomb fondu).
- Le projet IFR a développé des combustibles métal en alliage U-xPu -10Zr, x= 0-26 et un foisonnement (smear) de 75%. Le rapport plenum/combustible est $1.0 \div 1.5$.
 - de longs burn-up obtenus avant la fin de EBR-II: 20 atome % (≈ 200 GW/d/t)
 - Facilité de re-fabrication du combustible (moulé) et du retraitement (pyro-elec.)
 - Haute densité du combustible
 - Haute conductivité, basses températures centrales (même T_c/T_m que les oxydes)
 - Le réacteur peut opérer même avec une aiguille de combustible brisée
- Cette technologie pourrait être étendue aux combustibles Th avec des températures maximales plus élevées (à confirmer).
 - changement de phase des alliages qui limitent la fusion au centre, (U-20Pu-10Zr liquide @ 1068°C ,Th-20Pu liquide @ 1450°C)
 - interactions entre le métal combustible et les gaines: les températures sont $\approx 150^\circ\text{C}$ plus élevées (alliage Th-Fe 875°C), (HT-9 température fluage : 650°C).
- Pour les combustibles métalliques: une énergie modérée se disperse dans le métal, le fluage de gaine est négligeable.

Régénération du combustible (Retraitement)

La régénération du combustible est une part essentielle de la méthode. Tous les actinides doivent être récupérés à la fin du cycle afin d'assurer une valeur de k convenable ainsi qu'un impact minimal sur l'environnement.

- A cause de la réduction de la masse totale de combustible pendant la combustion (10-15% de différence du ^{232}Th entre début et fin du cycle), une petite région de couverture fertile Th doit être ajoutée afin de conserver le même inventaire de ^{233}U .
- Deux types de retraitement seront considérés (avec une nette préférence pour le pyro-electrique):
- Le retraitement type THOREX, démontré en principe, mais pas à grande échelle. Très semblable au procédé standard PUREX (on peut utiliser la même installation), il y a cependant quelques trouble-fête:
 - corrosion du solvant
 - nécessité d'obtenir une licence
 - taux de production réduit à cause de la grande concentration de ^{233}U .

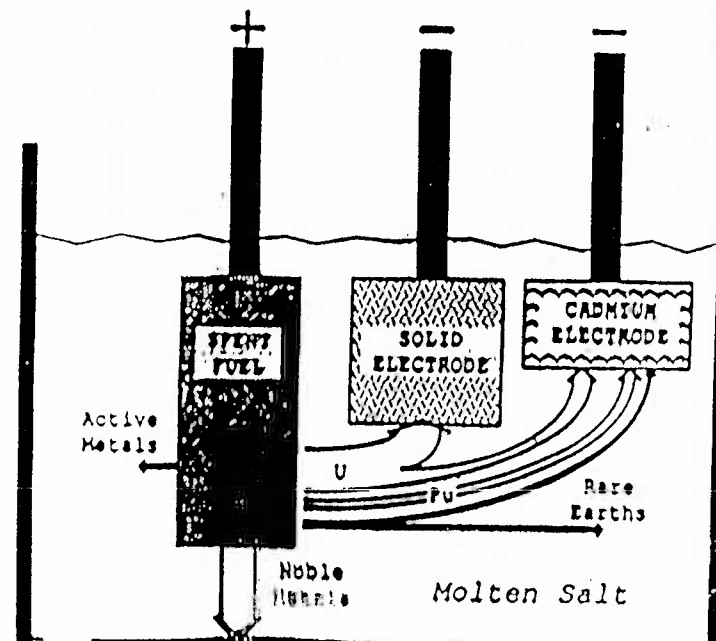
Régénération du combustible (suite)

- Dans le retraitement Pyro-électrique, le combustible, (métal ou réduit en métal par action de Li) est séparé par électrolyse.
 - S'applique en principe au cas d'une matrice Thorium.
 - Encore au stade du développement (Argonne Nat. Lab.). Il faut encore mettre au point l'industrialisation du procédé.
- L'état actuel laisse entrevoir une séparation au niveau de 10^{-3} entre les actinides et les PF : un niveau de $f \geq 10^{-4}$ serait désirable pour minimiser l'impact sur l'environnement.
- Les produits de fission sont séparés des actinides et constituent les "déchets". La courbe de radio-toxicité tombe très vite au départ et présente une pente de plus longue vie après 500 ans.
- Les éléments de vie longue extraits au cours du retraitement peuvent être incinérés sans perte de flux à l'intérieur de l'AE. Pour certains éléments (99-Tc, 129-I), une séparation chimique suffit, d'autres (Cs) demandent une séparation isotopique.
- On a démontré que l'élimination de 99-Tc et 129-I est possible.



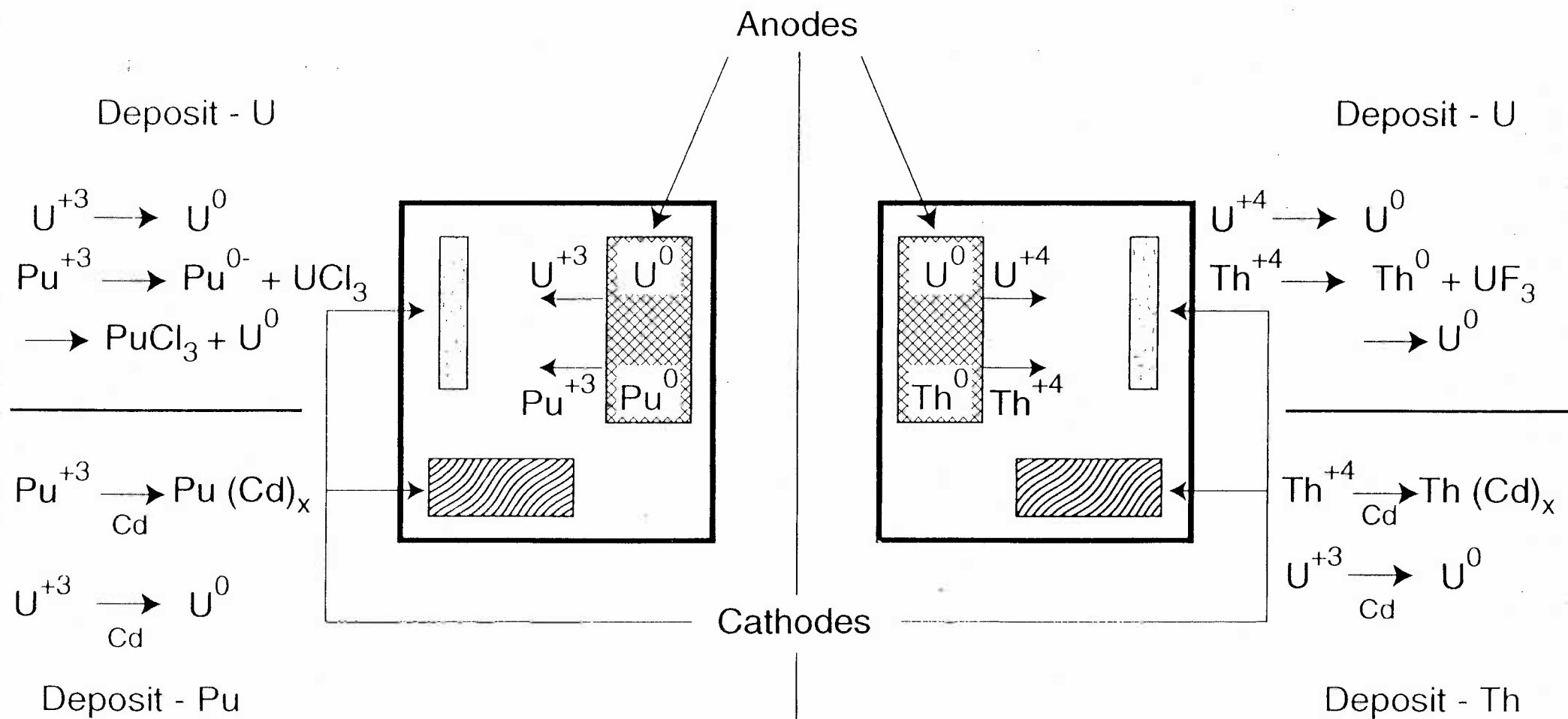
ELECTROREFINING

- Actinide Elements are Separated from Fission Products for Recycle in Fresh Fuel Elements
 - >99.9% recovery
 - plutonium is combined with all minor actinides (Np, Am, Cm) and an approximately equal amount of uranium
 - contamination of fuel product with rare earth fission products
- Fission Products are Separated and Immobilized for Disposal
- Removal of Actinides from High-Level Waste



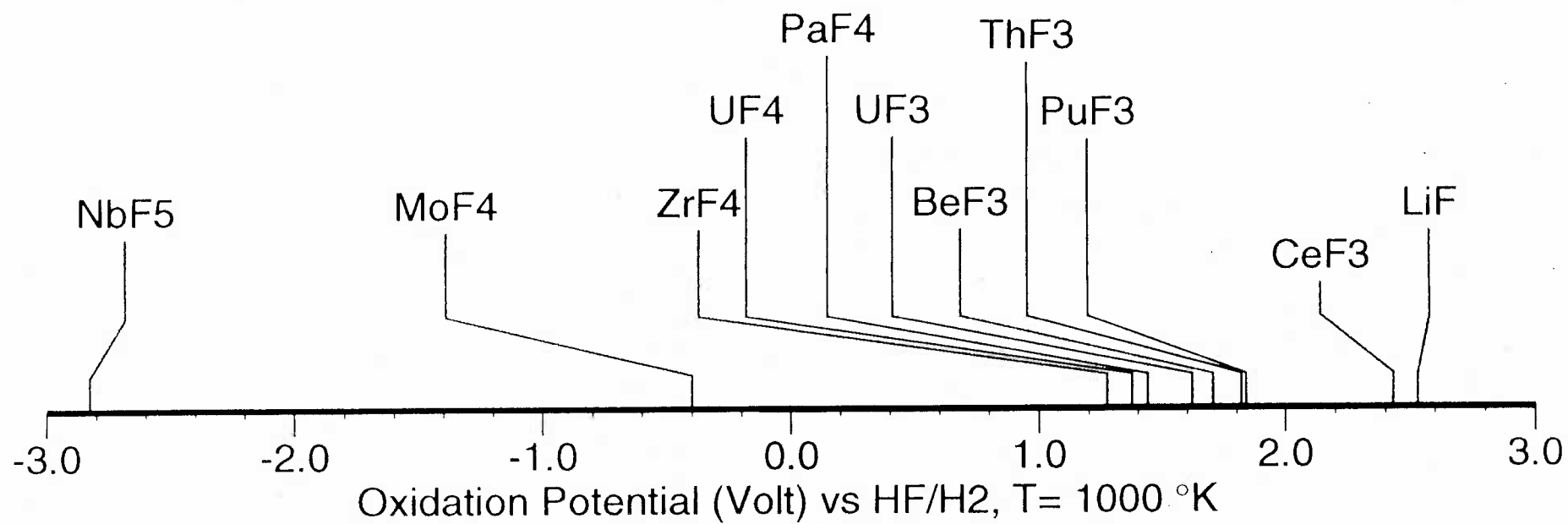
U/Pu System ◀

▶ Th/U System

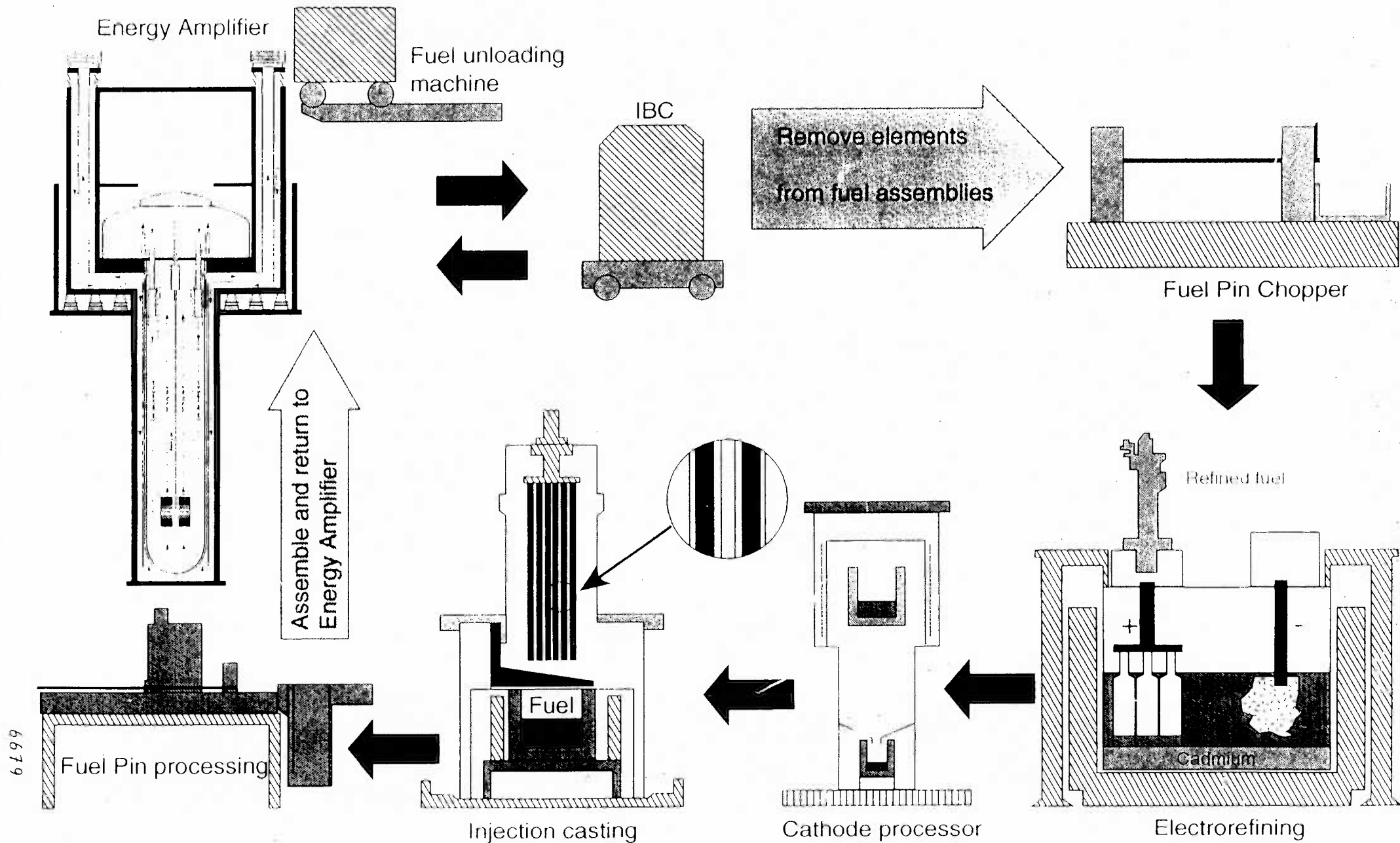


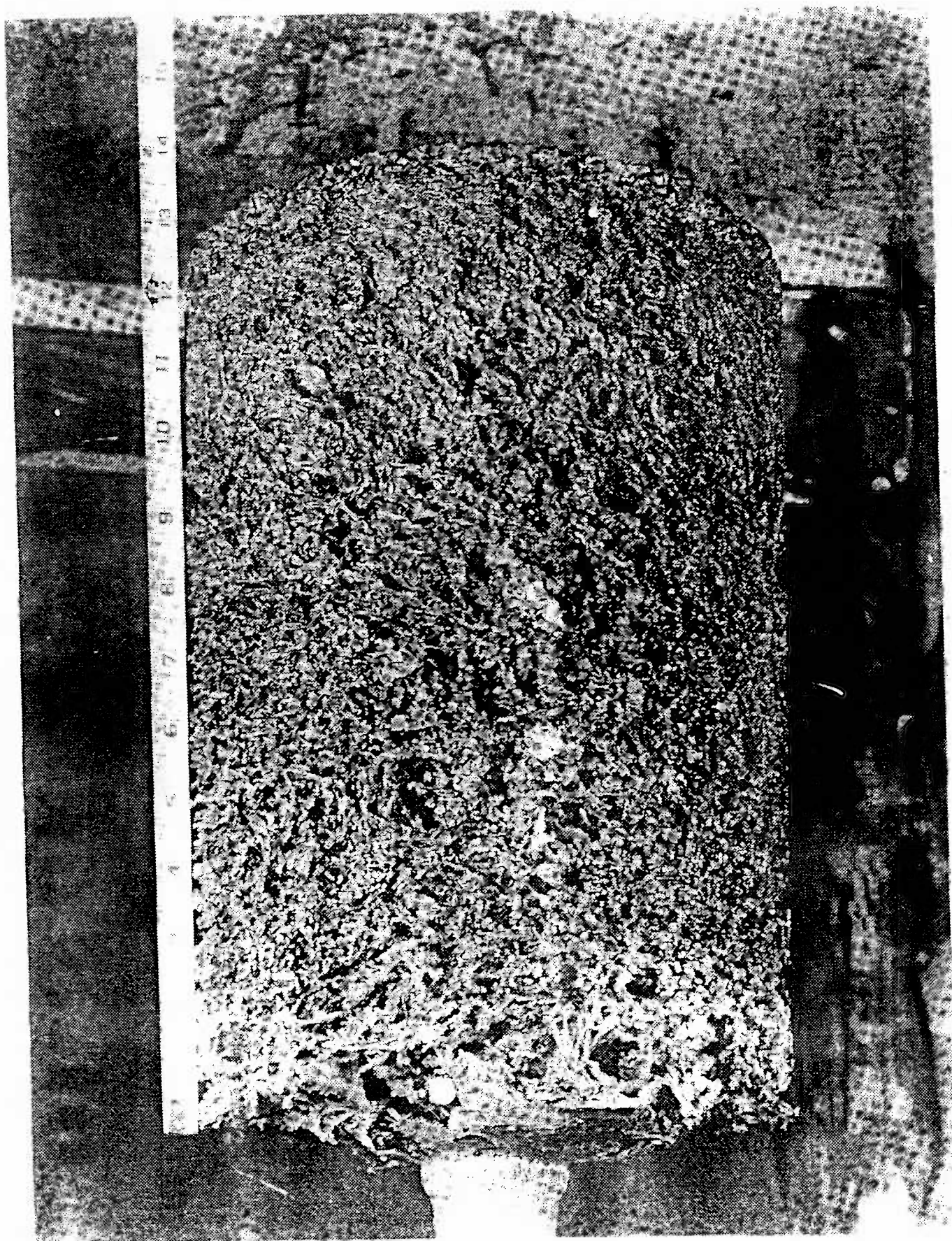
DG - kCal/equiv. 800 °K
 PuCl₃ - 61.9
 UCl₃ - 54.7

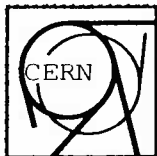
ThF₄ - 110.6
 UF₃ - 105.9
 UF₄ - 100.6



Recycle Technology: A simple, Few-Step, Discrete Process







Elimination du Plutonium

66

L'élimination complète par fission, du Plutonium (qu'il soit de qualité militaire ou qu'il provienne des REP) est un des objectifs principaux du programme AE.

- **La fission complète produit une énergie considérable .
L'élimination d'une 1 tonne of Plutonium ➡ ➡ 940 GW J, ➡ ➡ 14.4 Million de barils de pétrole. Ceci est une ressource précieuse dans une économie dont le "profit" est le moteur. Sa production et sa récupération va donc dominer les choix techniques.**
- **La masse critique de ce mélange en évolution est en général plus grande que celle du Pu initial (Macgill). La Radio-toxicité est fortement augmentée par l'incinération (Am).
➡ ➡ L'élimination doit donc être complète.**
- **Une série de cycles fermés de combustible est nécessaire. Pour minimiser ce nombre de cycles (≤ 10) un long burn-up est nécessaire à chaque cycle ($100+ 150 \text{ GW} \times \text{jour/tonne}$). Pour raccourcir le cycle (2 ans), la puissance spécifique doit être élevée (150 W/gr) pour une élimination complète en ≤ 20 ans**

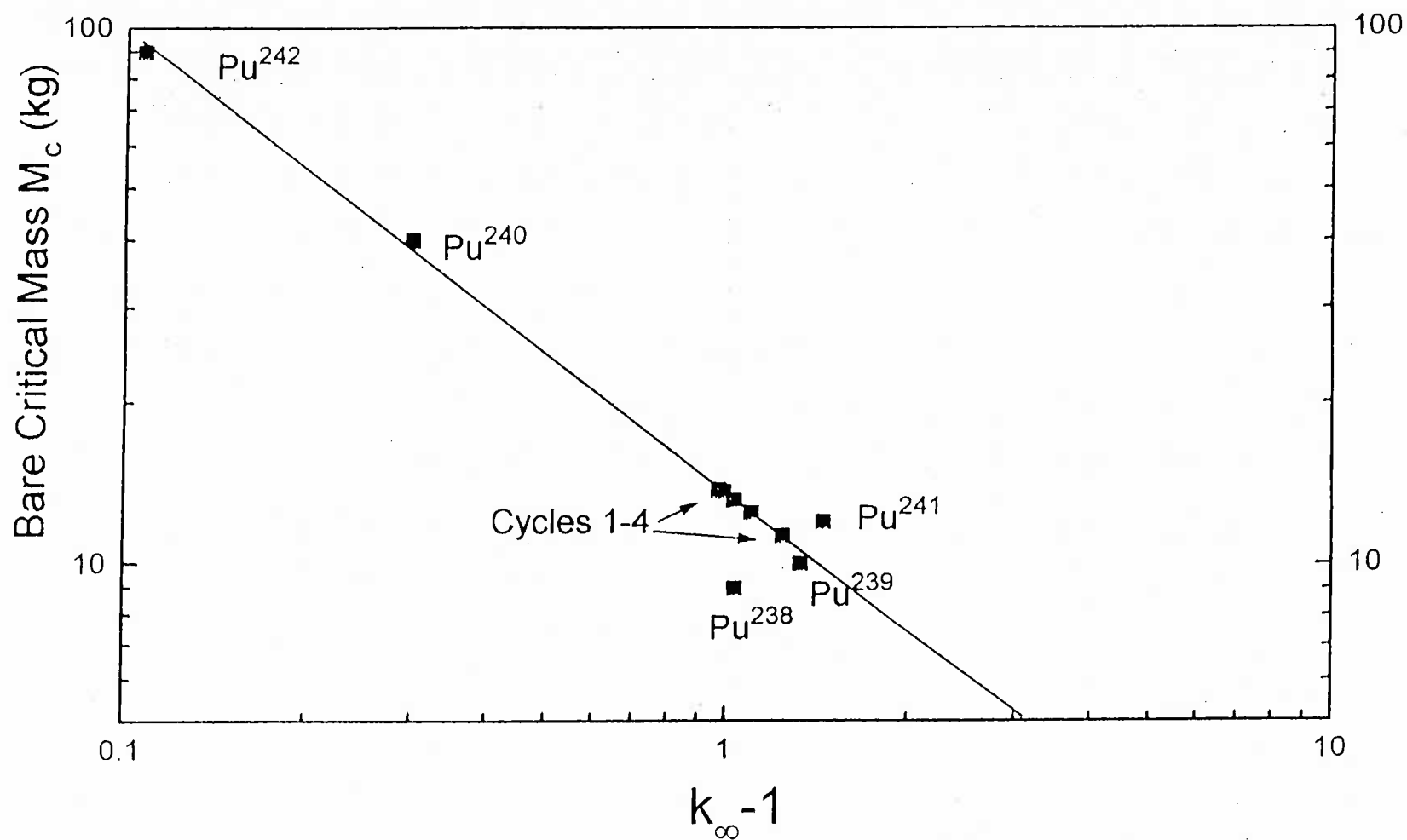
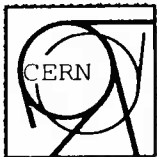


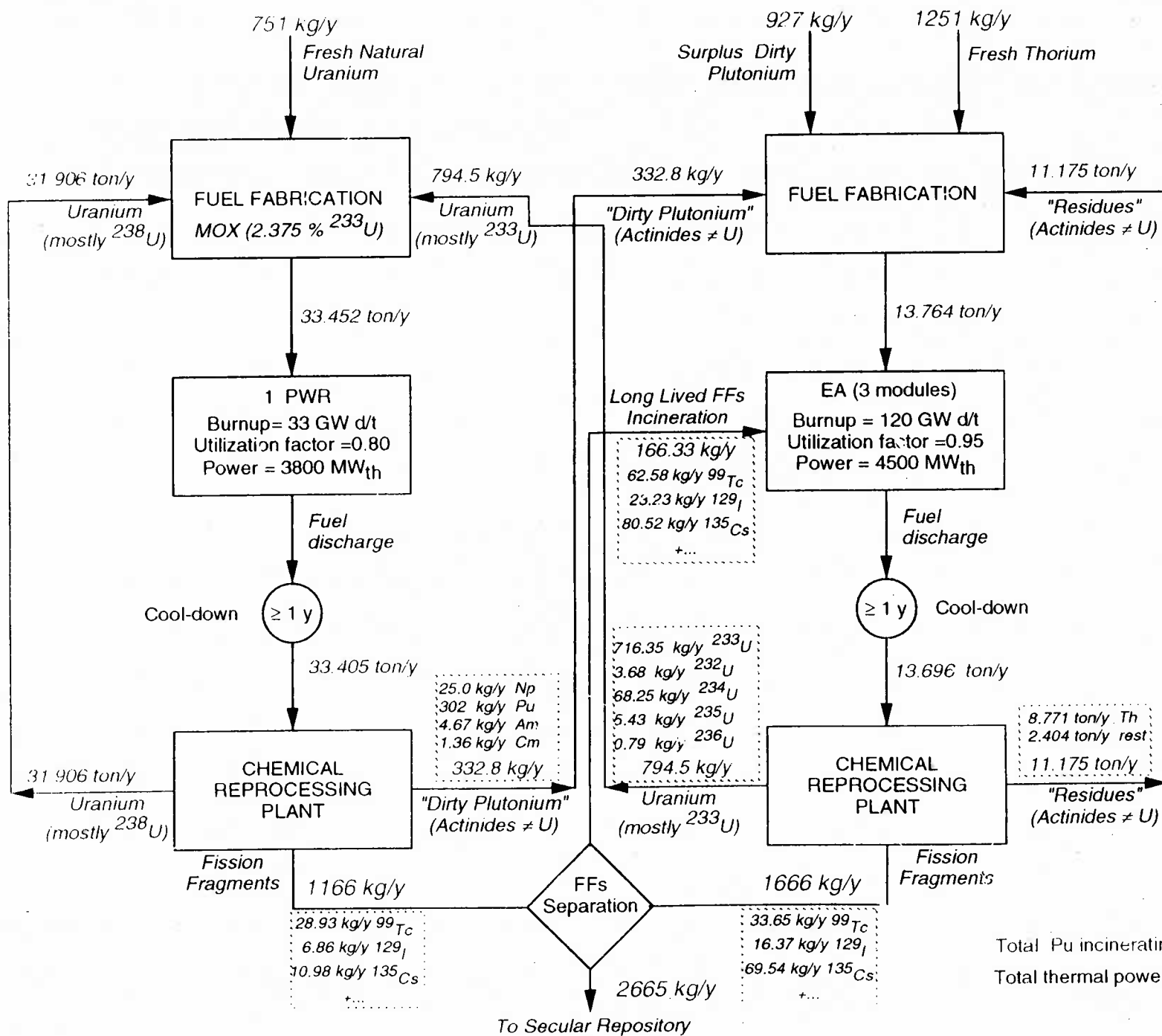
Figure 5. Bare critical mass dependence on $k_{\infty} - 1$.

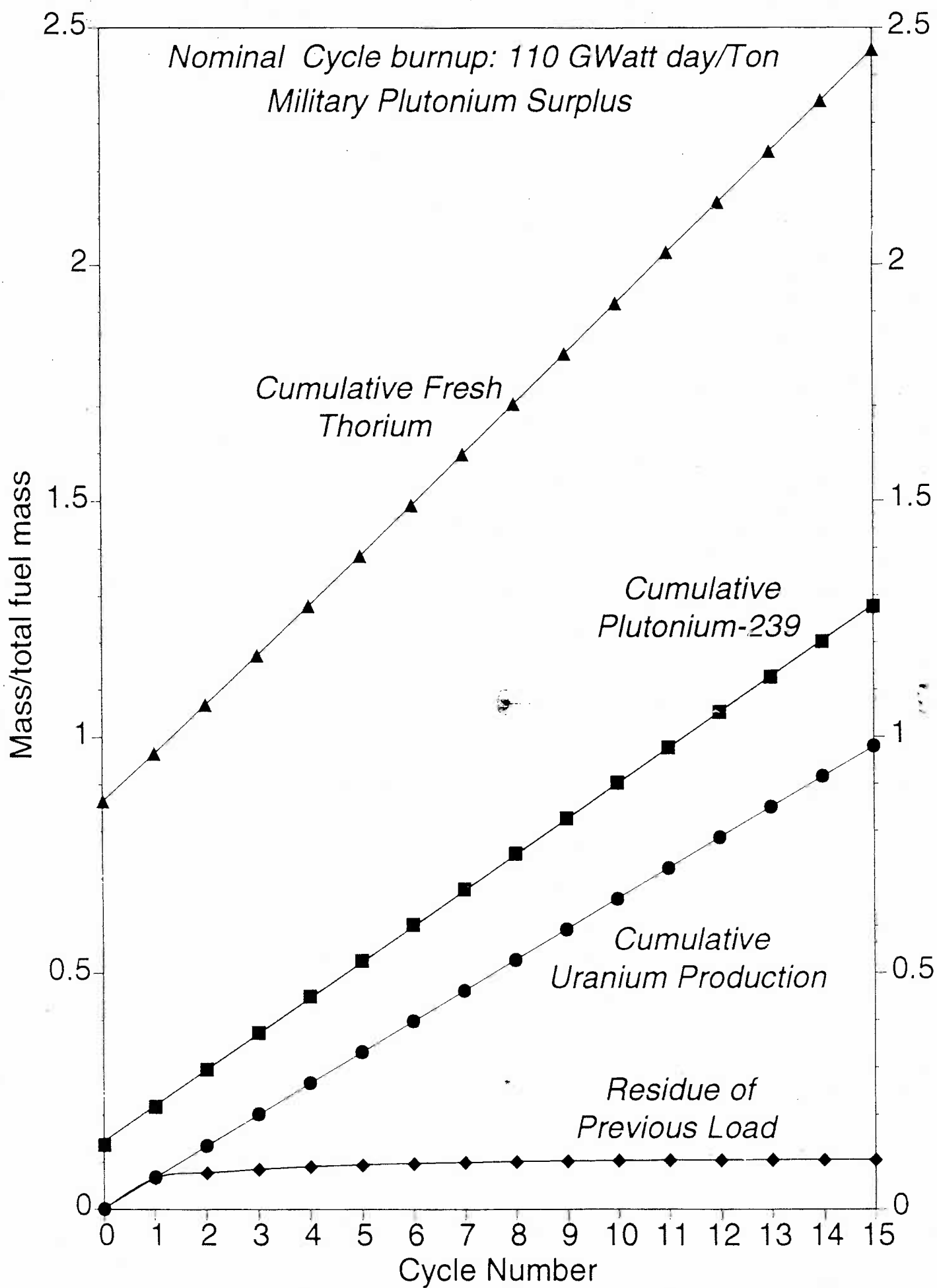


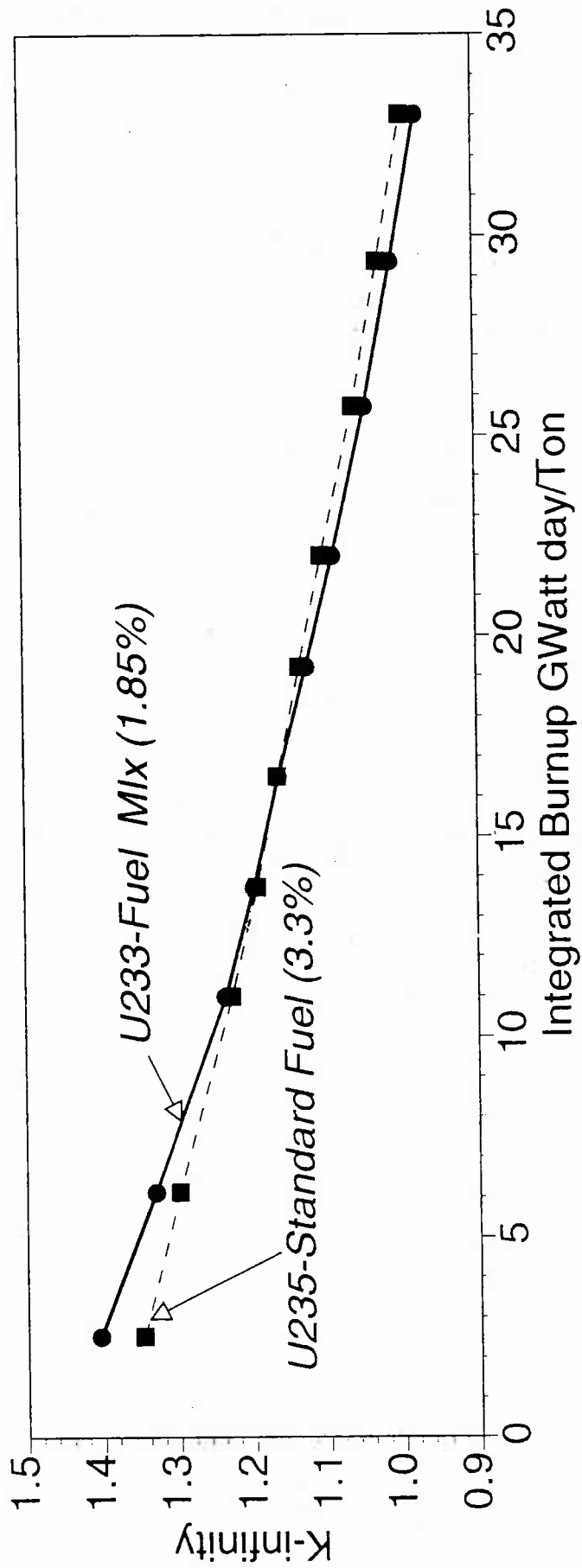
Elimination du Plutonium (suite)

68

- La constance maximale du facteur de multiplication k doit être maintenue durant le long burn-up et au cours des cycles successifs. On y parvient en rajoutant un milieu fertile intermédiaire au Pu, afin de compenser la perte de réactivité du plutonium éliminé et de ses descendants dans la chaîne actinide séculaire. Ce milieu ne peut être ^{238}U , qui produirait du plutonium supplémentaire.
 - ➡ ➡ Notre choix pour ce milieu est le Thorium.
- L'utilisation d'un mélange avec du Thorium conduit à la production de ^{233}U à la fin d'un cycle. De ce fait, l'incinérateur se comporte comme un convertisseur plutonium- ^{233}U très efficace ($\geq 70\%$). ^{233}U doit à son tour être éliminé en (1) le dénaturant avec de l'uranium ordinaire ou appauvri (2) le brûlant comme un combustible ordinaire dans un REP ou un AE. Le plutonium ainsi engendré est recyclé dans la chaîne d'élimination du plutonium
 - ➡ ➡ Nécessité d'un cycle associant chaîne d'élimination + REP







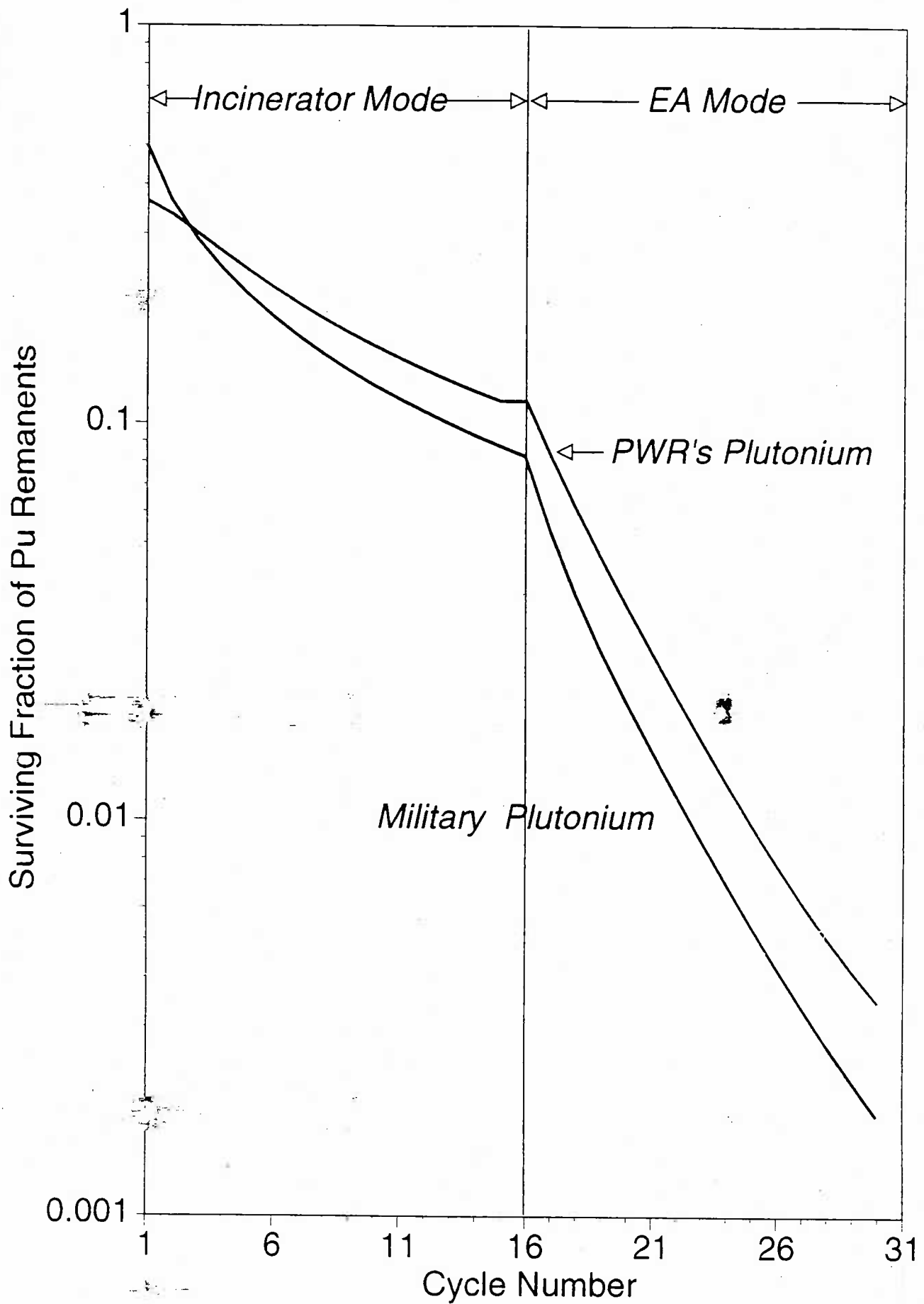
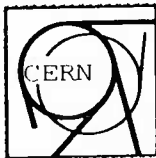


Figure 1.7a 6437



Développements accélérateurs

L'accélérateur est un des éléments les plus innovants de l'EA. Par rapport aux machines existantes:

- Puissance de faisceau élevée, typiquement $10 + 20 \text{ mA @ } 1 \text{ GeV}$
- Rendement énergétique élevé, typiquement $\geq 50\%$
- Fonctionnement simple, de type industriel, disponibilité maximale ($\geq 95\%$)
- Modulaire, dimensions réduites et prix de construction réduit.
- Le LINAC standard satisfait (2) seulement pour des courants élevés ($\geq 200 \text{ mA}$) donc il doit être pulsé. La solution alternative d'une répartition du faisceau entre plusieurs AE soulève des problèmes de sûreté de réacteur en cas de blocage. Le prix est trop élevé ($> 1\text{M\$}$) et les dimensions grandes. En conséquence, deux types de machines innovantes sont activement étudiées:
 - Un cyclotron isochrone, largement inspiré par la machine suisse de l'Institut Paul Scherrer (PSI), qui opère à l'heure actuelle avec plus de 1 mA
 - Un LINAC supraconducteur, prenant modèle sur les cavités construites au CERN pour le LEP200. Pour le LEP, un courant e^+ de $\sim 14 \text{ mA}$ est soumis à une accélération constante de $\sim 2.5 \text{ GeV/tour}$. Il est possible d'adapter ce schéma au cas non-relativiste des protons, fournissant un courant jusqu'à $20 \text{ mA @ } 2.5 \text{ GeV}$
- Les deux schémas apparaissent praticables pour un coût raisonnable ($100\text{-}150 \text{ M\$}$, au niveau du prototype industriel).

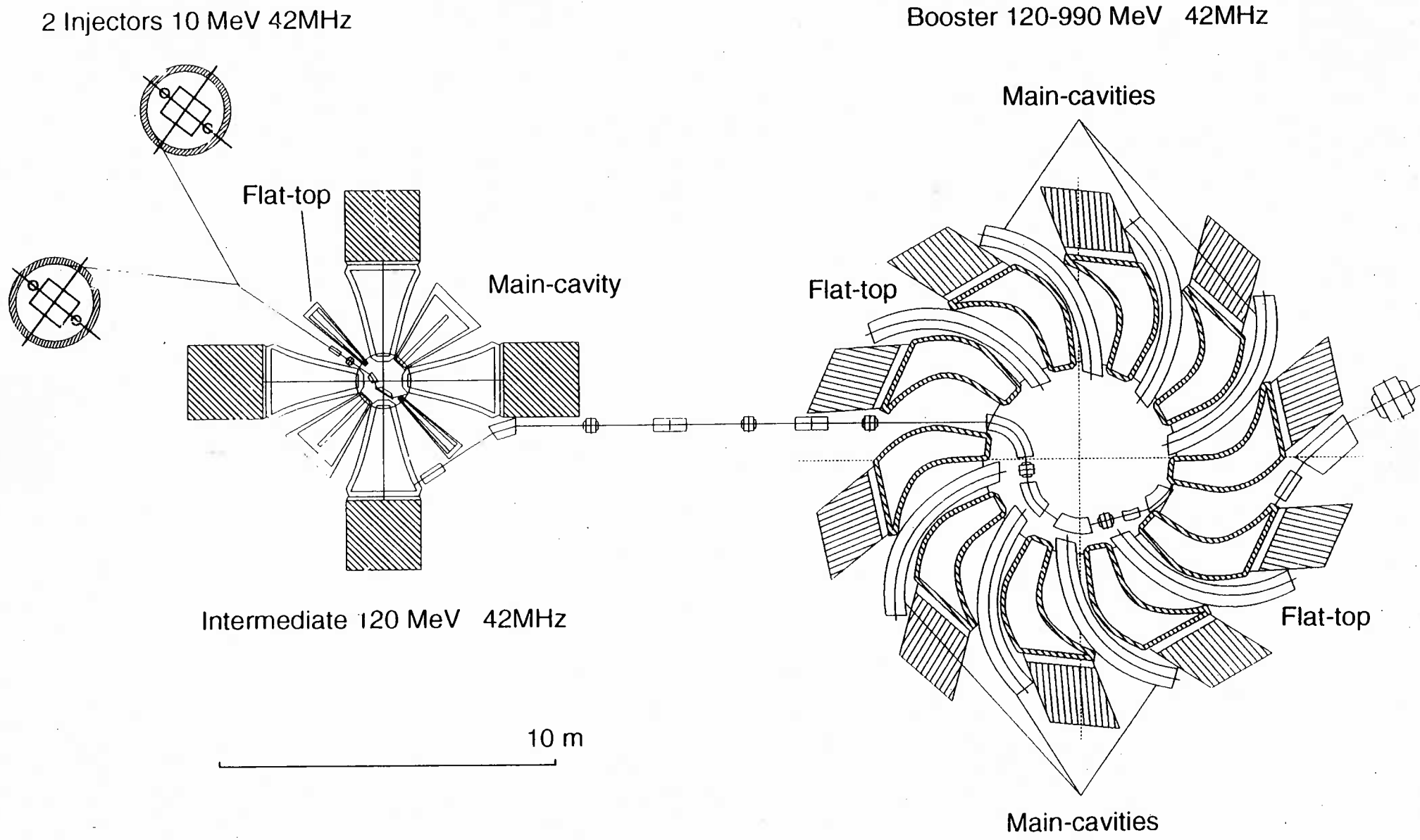
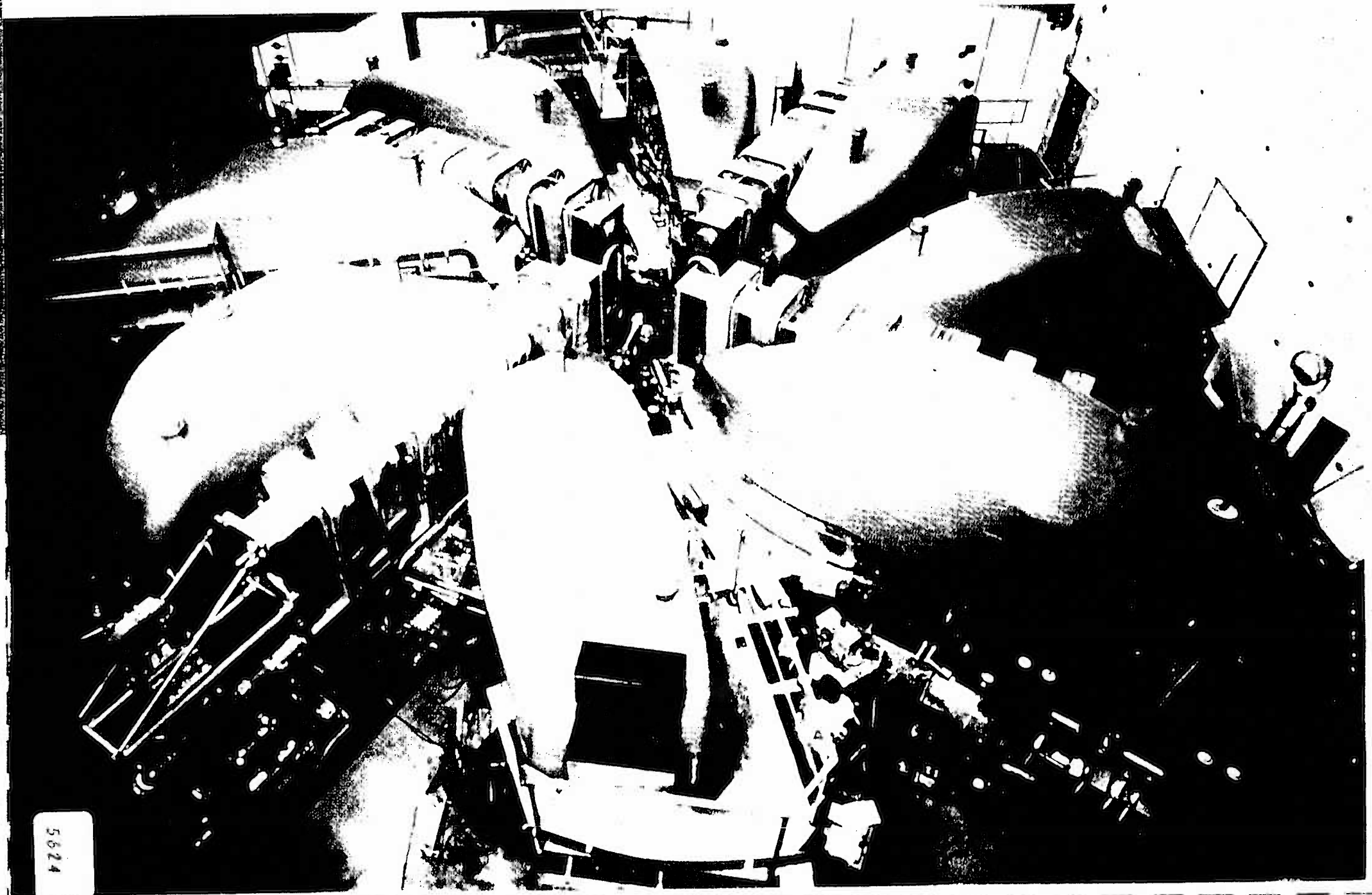


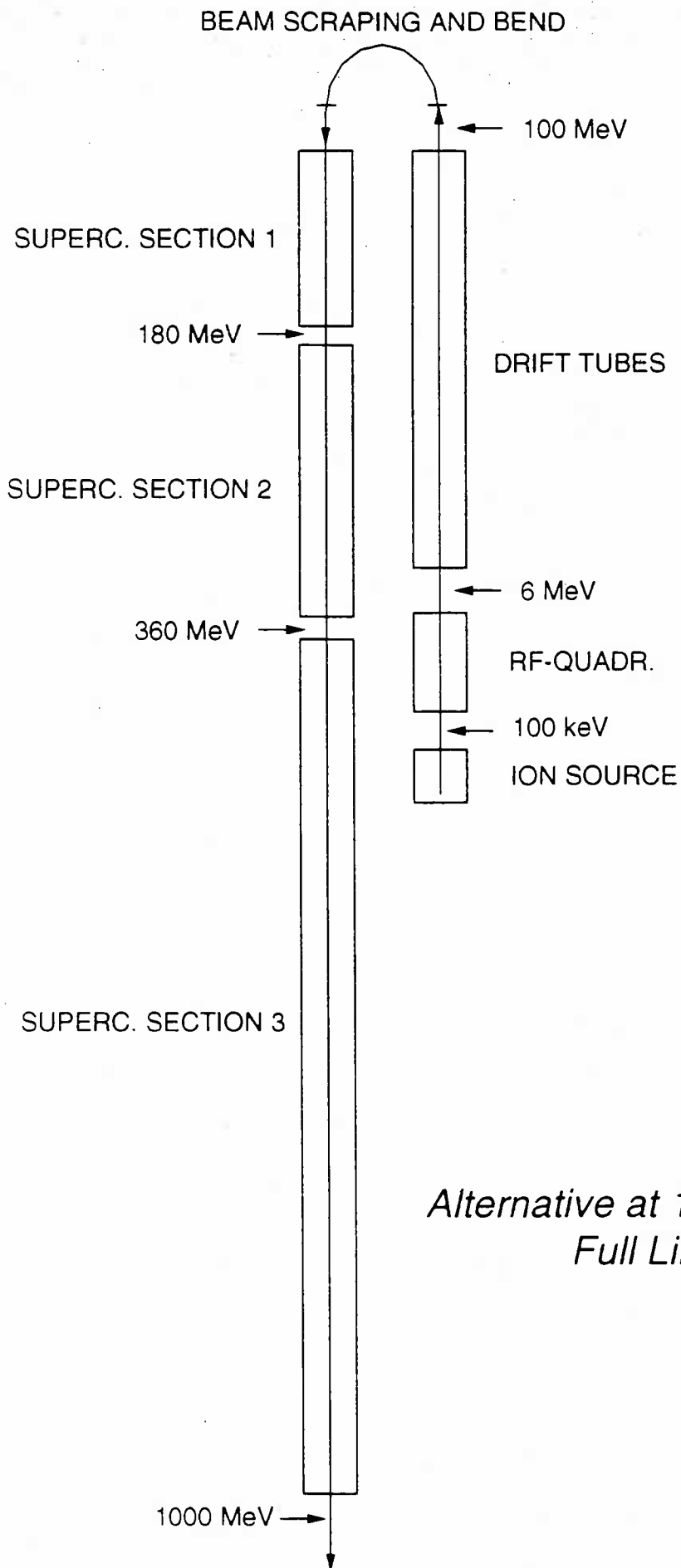
Figure 3.1



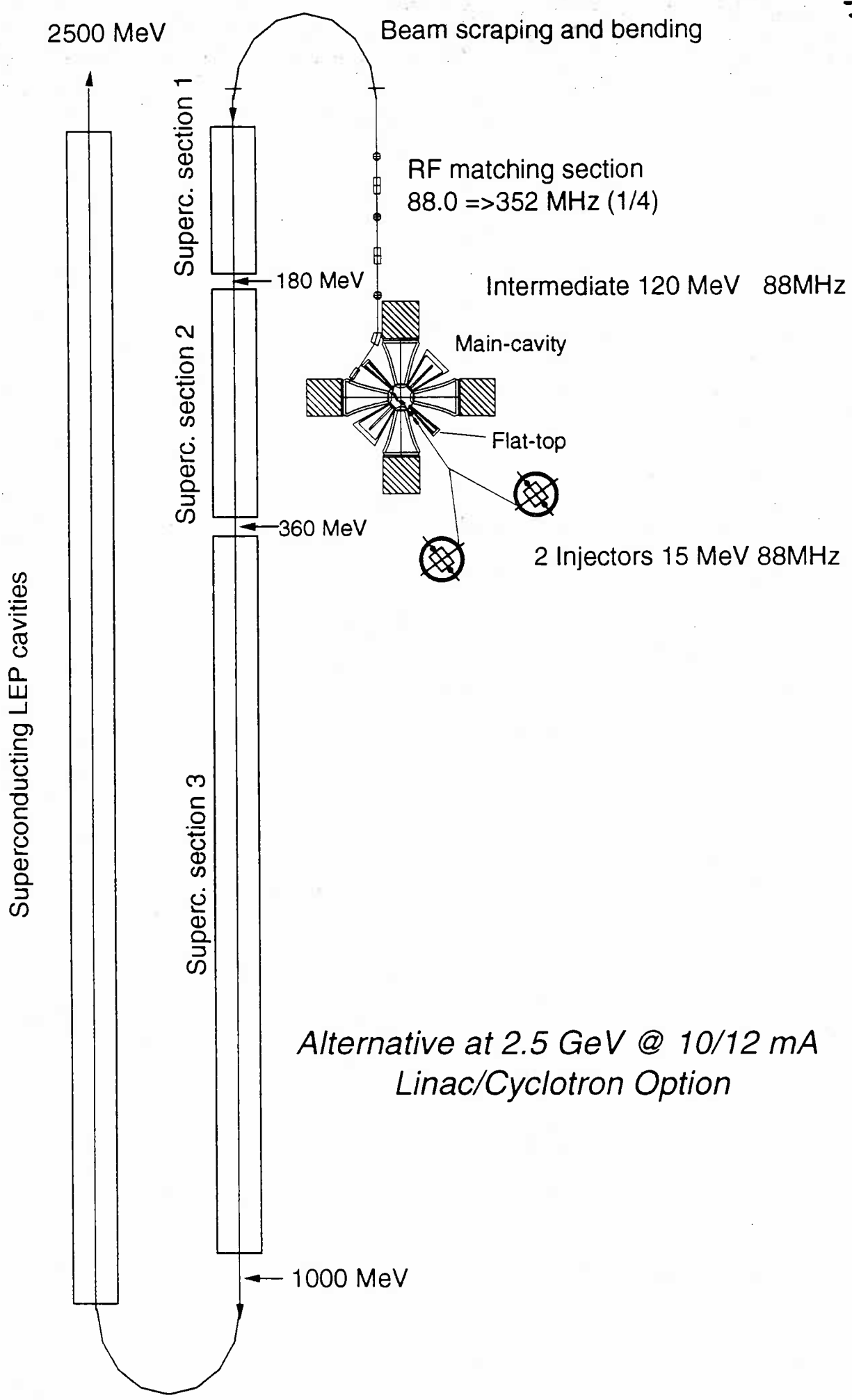
5624

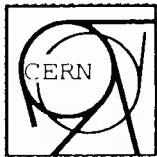
ns SUPERMERE 1 OREN 9PC 1

1 ns SUPERMERE 1 OREN 9PC 1



*Alternative at 1 GeV @ 25/30 mA
Full Linac Option*





0)-Expériences au CERN

Des expériences de validation sont en cours au PS du CERN afin de vérifier directement les concepts de base à puissance très réduite (10^9 proton p.p, de 0.7- 3.7 GeV) et une source de neutrons de spallation

- **Une première expérience (FEAT) a permis de confirmer la possibilité de produire de l'énergie et de vérifier les prédictions de gain .**
- **Une seconde expérience (TARC) est en cours. On dispose d'un massif de plomb de haute pureté (360 tonnes) utilisé pour:**
 - **Valider les rendements absolus de production de neutrons au cours des processus de spallation et de diffusion subséquente (mesures de spectres)**
 - **Valider les calculs sur la propagation des neutrons dans le plomb.**
 - **Démontrer une possibilité nouvelle d'incinération rapide et efficace des PF et actinides en utilisant la méthode de l'"adiabatic resonance crossing".**
 - **Démontrer le fonctionnement d'une "boîte d'incinération" .**
 - **Mesurer le taux d'incinération des éléments à longue vie les plus nuisibles**
- **Des codes informatiques innovants ont été développés, pour des ordinateurs parallèles et avec techniques de MonteCarlo.**

The FEAT experiment:

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE
ENERGY GENERATED IN NUCLEAR
CASCADES BY A HIGH ENERGY BEAM**

CEN, Bordeaux-Gradignan, France

CIEMAT, Madrid, Spain

CSNSM, Orsay, France

CEDEX, Madrid, Spain

CERN, Geneva, Switzerland

Dipartimento di Fisica e INFN, Università di Padova,
Padova, Italy

INFN, Sezione di Genova, Genova, Italy

IPN, Orsay, France

ISN, Grenoble, France

Sincrotrone Trieste, Trieste, Italy

Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain

Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain

University of Athens, Athens, Greece

University of Basel, Basel Switzerland

University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

80

5711



The TARC experiment:

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE
PHENOMENOLOGY OF SPALLATION
NEUTRONS IN A LARGE LEAD BLOCK**

CEN, Bordeaux-Gradignan, France

CEDEX, Madrid, Spain

CERN, Geneva, Switzerland

Dipartimento di Fisica e INFN, Università di Padova,
Padova, Italy

INFN, Sezione di Genova, Genova, Italy

IPN, Orsay, France

ISN, Grenoble, France

Sincrotrone Trieste, Trieste, Italy

Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain

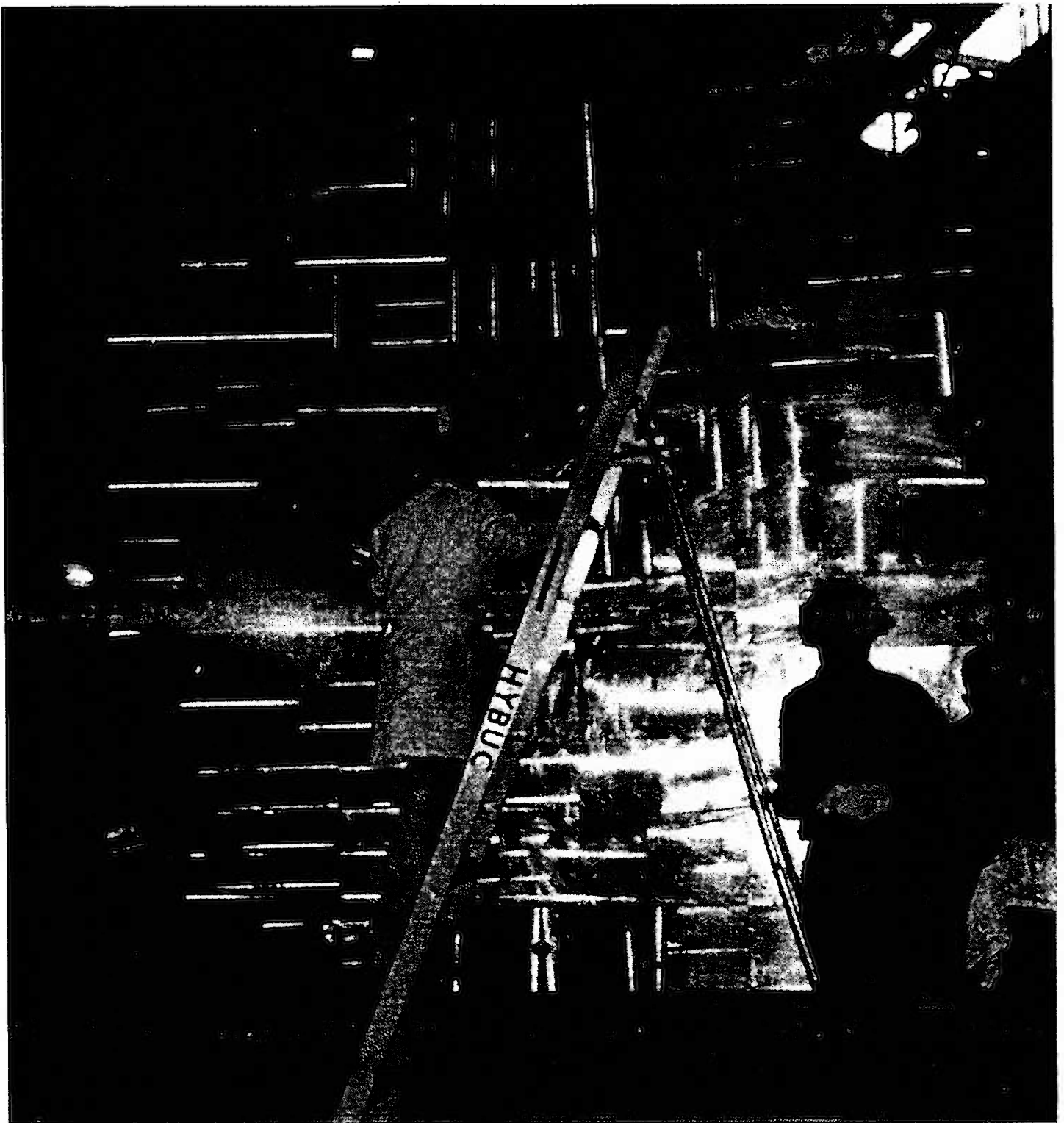
University of Athens, Athens, Greece

University of Basel, Basel Switzerland

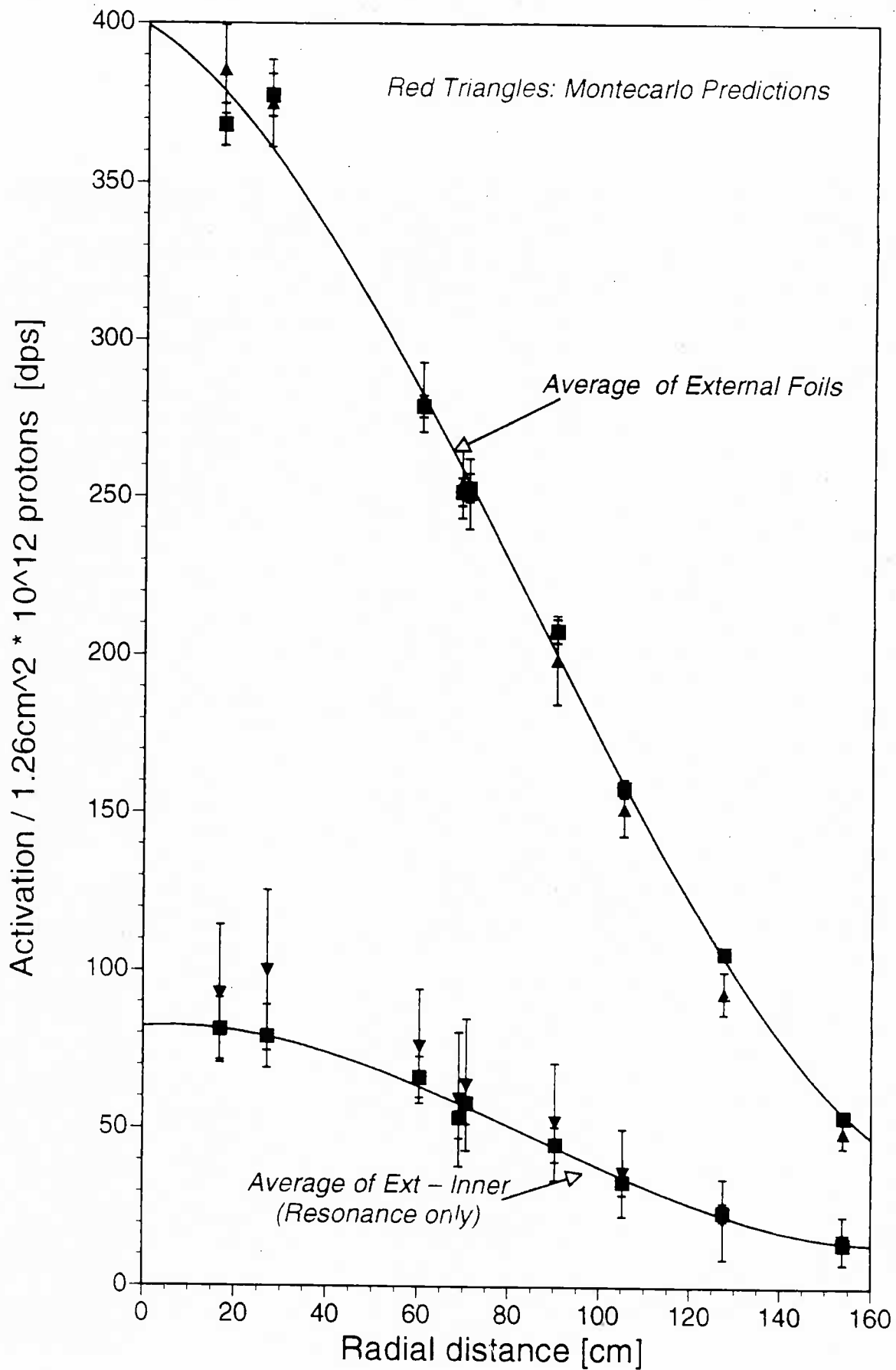
University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Universidad Alfonso X el Sabio, Madrid, Spain

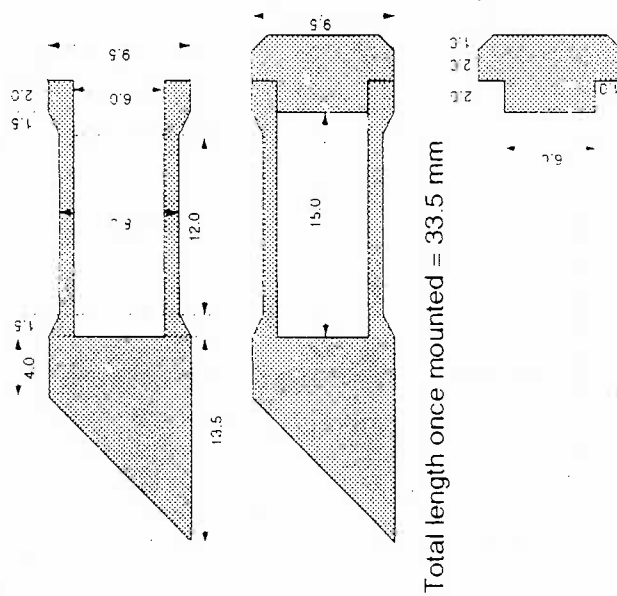
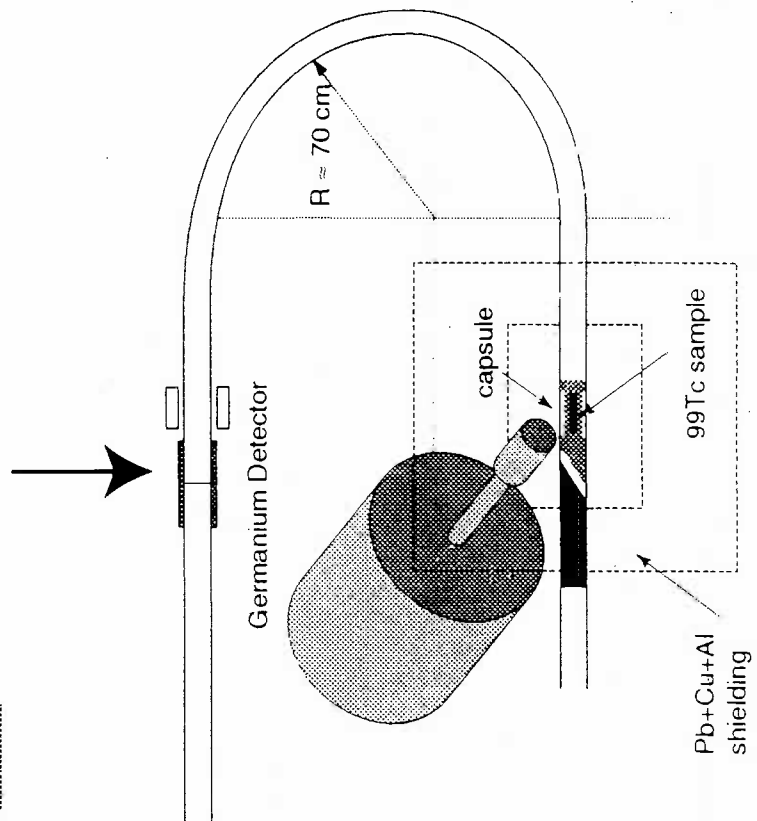
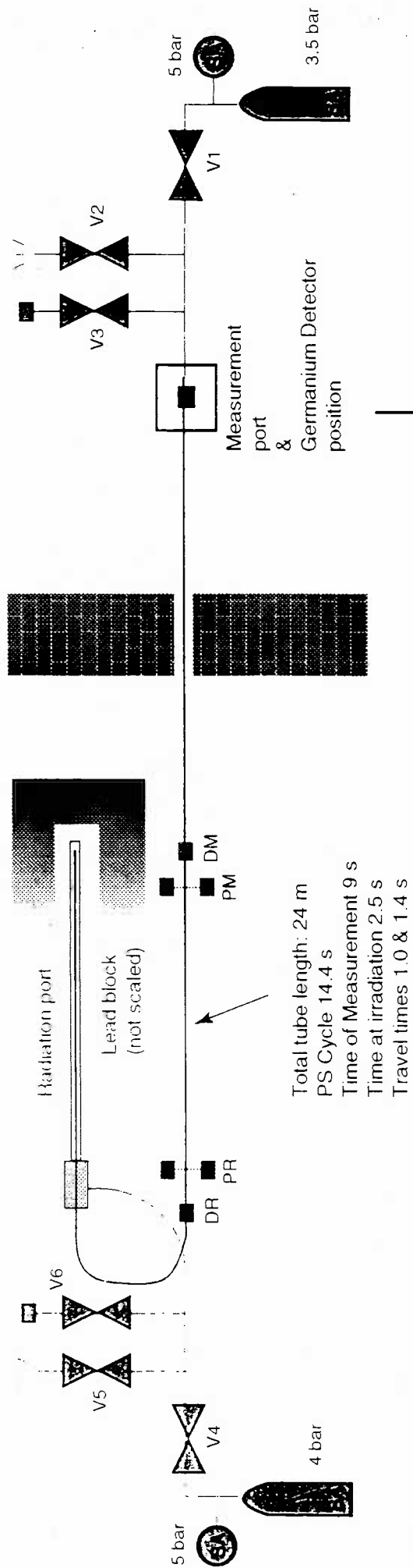
Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain



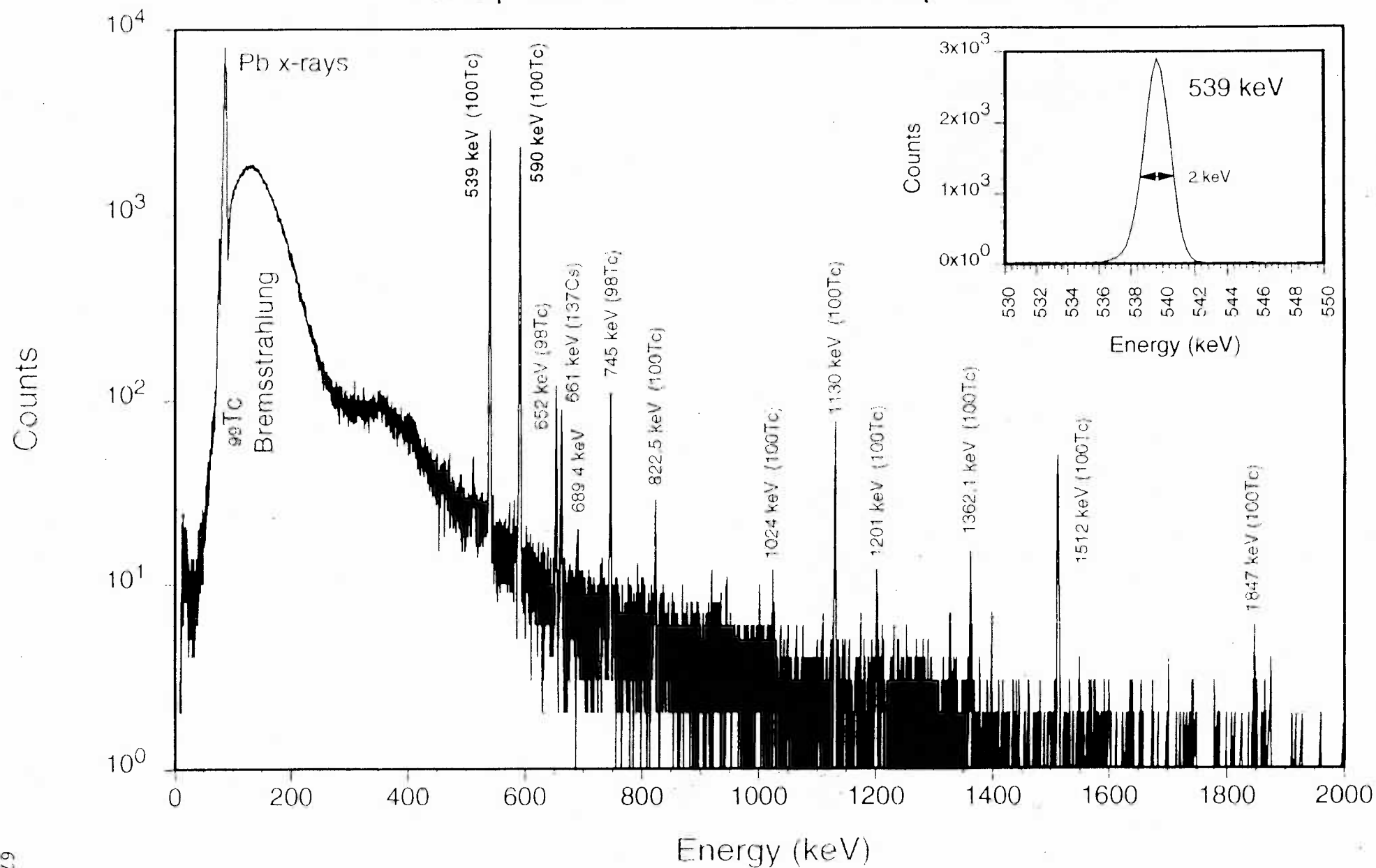
Gold Activation (4.9 eV)



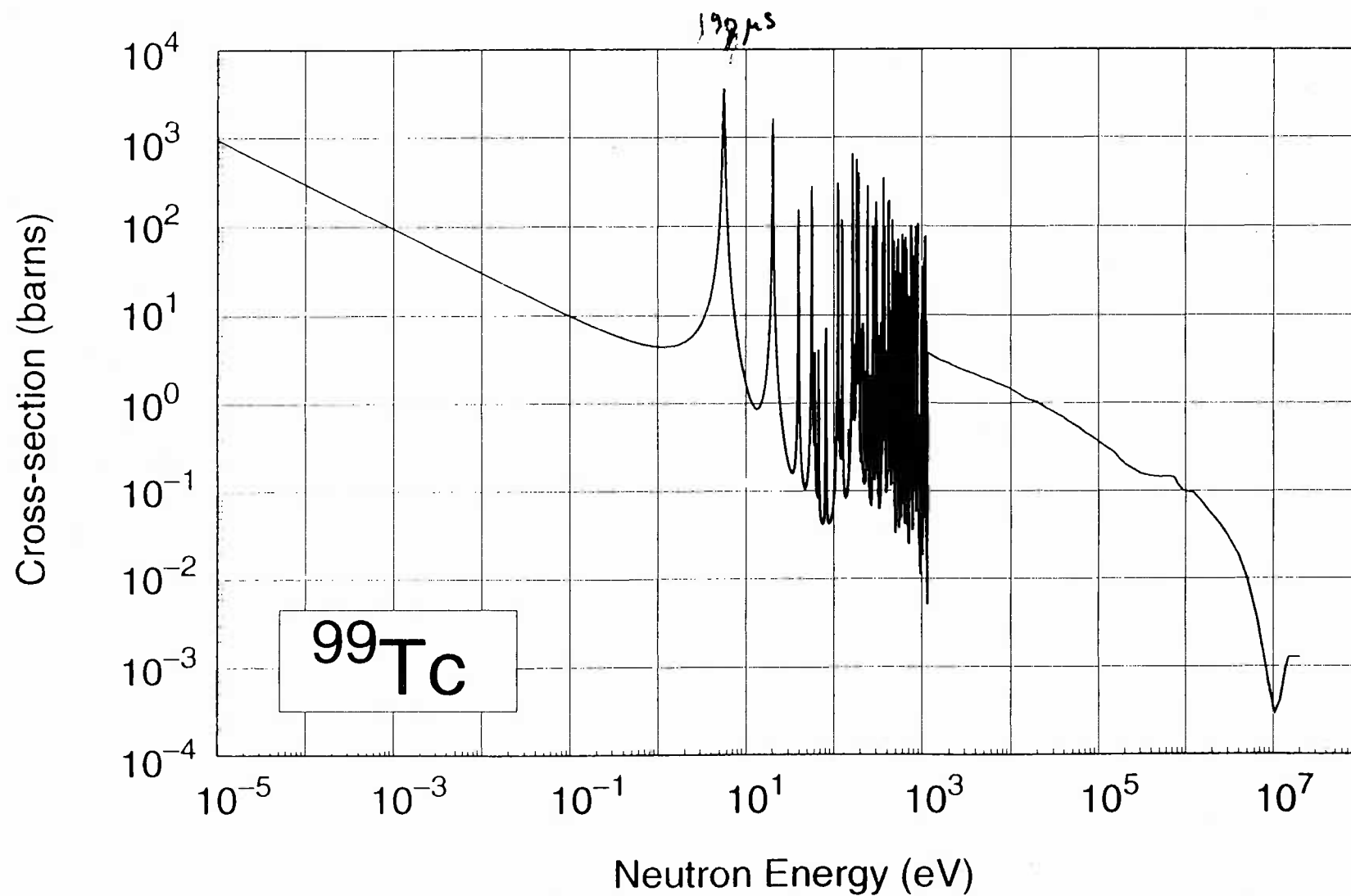
Rabbit System



^{100}Tc Spectra from TARC Experiment



^{99}Tc Neutron Capture Cross-section



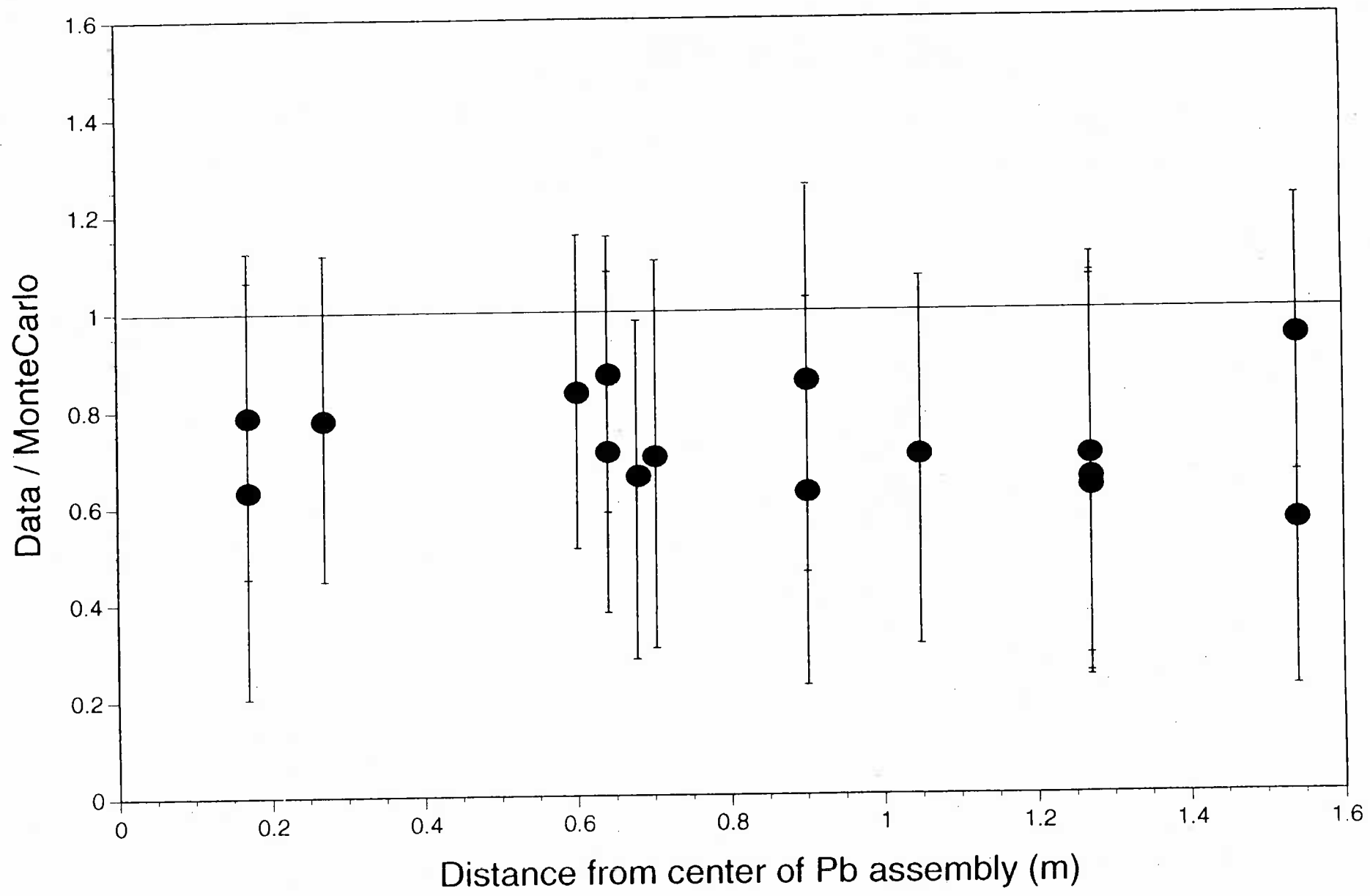


Table 6.1 - Fission fragments' activity after 1000 years of cool-down in the Secular Repository. Values are given for $1 \text{ GW}_e \times \text{year}$.

Radio- Isotope	1/e Life years	Mass (kg)	Other Isotopes (kg)	Activity @ 1000 y (Ci)	Ingestive Toxicity (Sv) $\times 10^3$	Dilution Class A (m ³)
¹²⁹ I	2.27E+7	8.09	3.48	1.43	19.58	178.47
⁹⁹ Tc	3.05E+5	16.61	—	284.29	27.67	947.65
¹²⁶ Sn	1.44E+5	1.187	1.783	33.79	3.20	9.65
¹³⁵ Cs	3.32E+6	34.12	66.77	39.32	9.87	39.32
⁹³ Zr	2.21E+6	26.11	99.11	65.64	2.38	18.75
⁷⁹ Se	9.40E+5	0.30	3.02	2.06	0.745	0.59

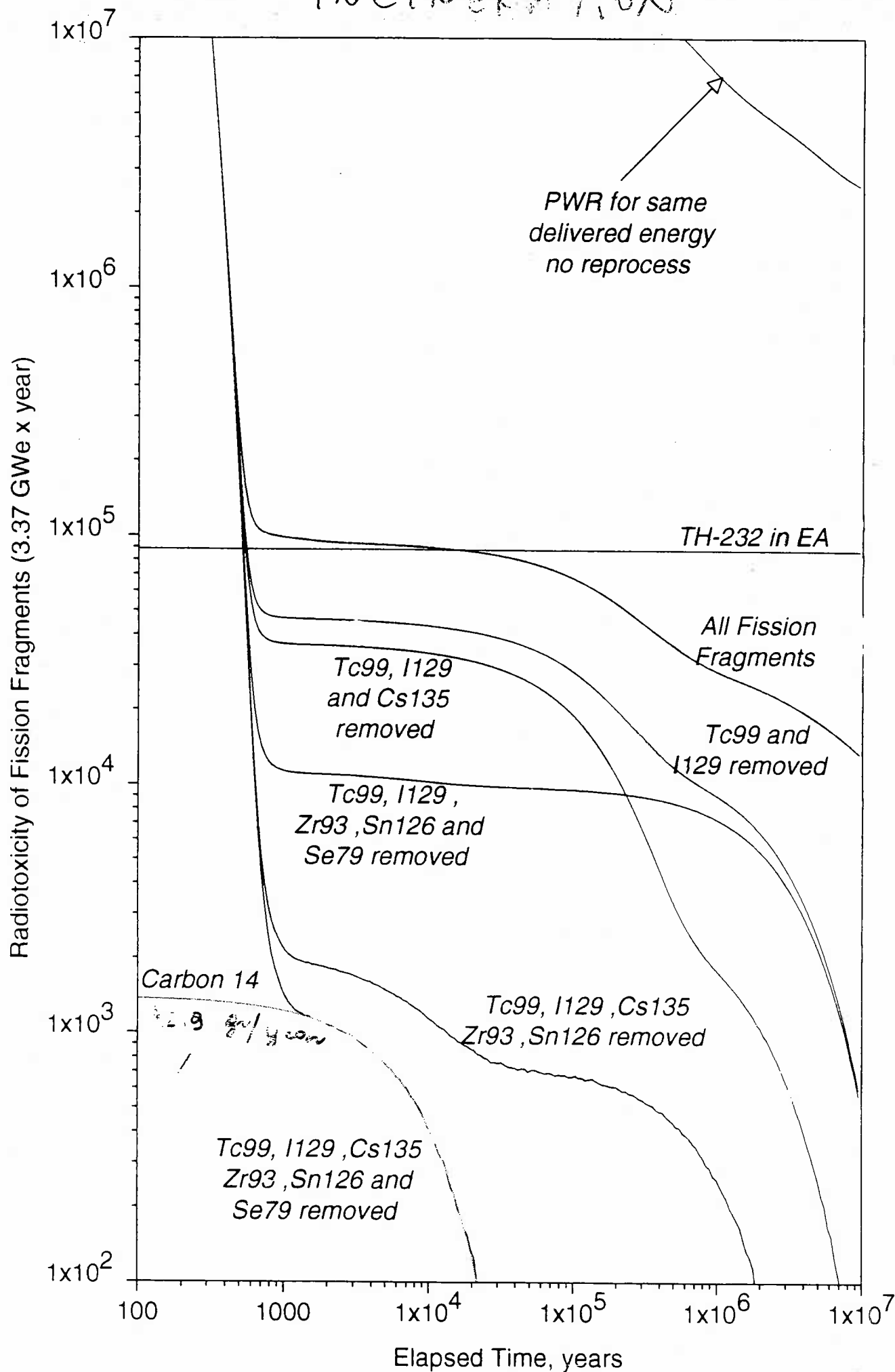
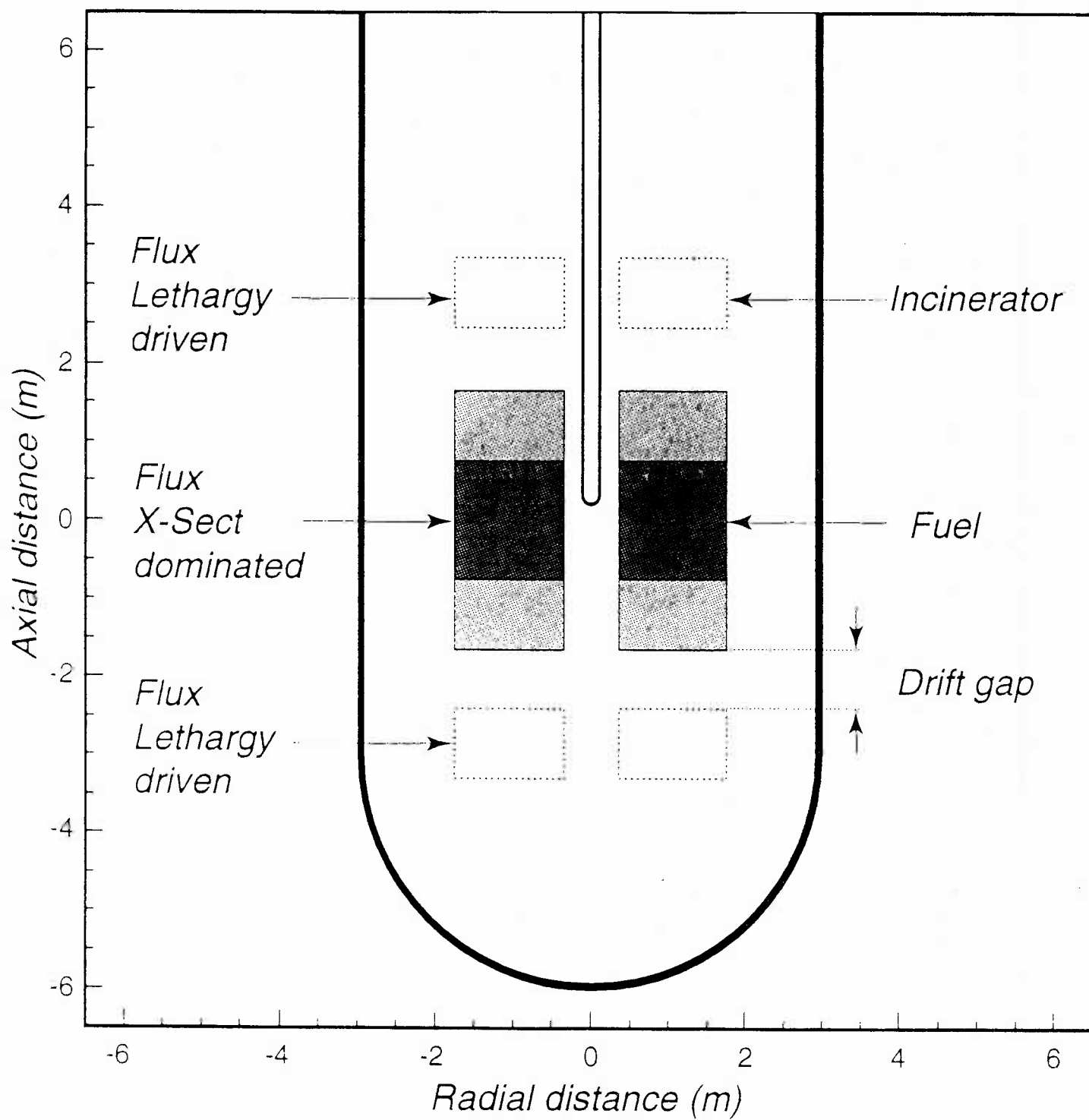
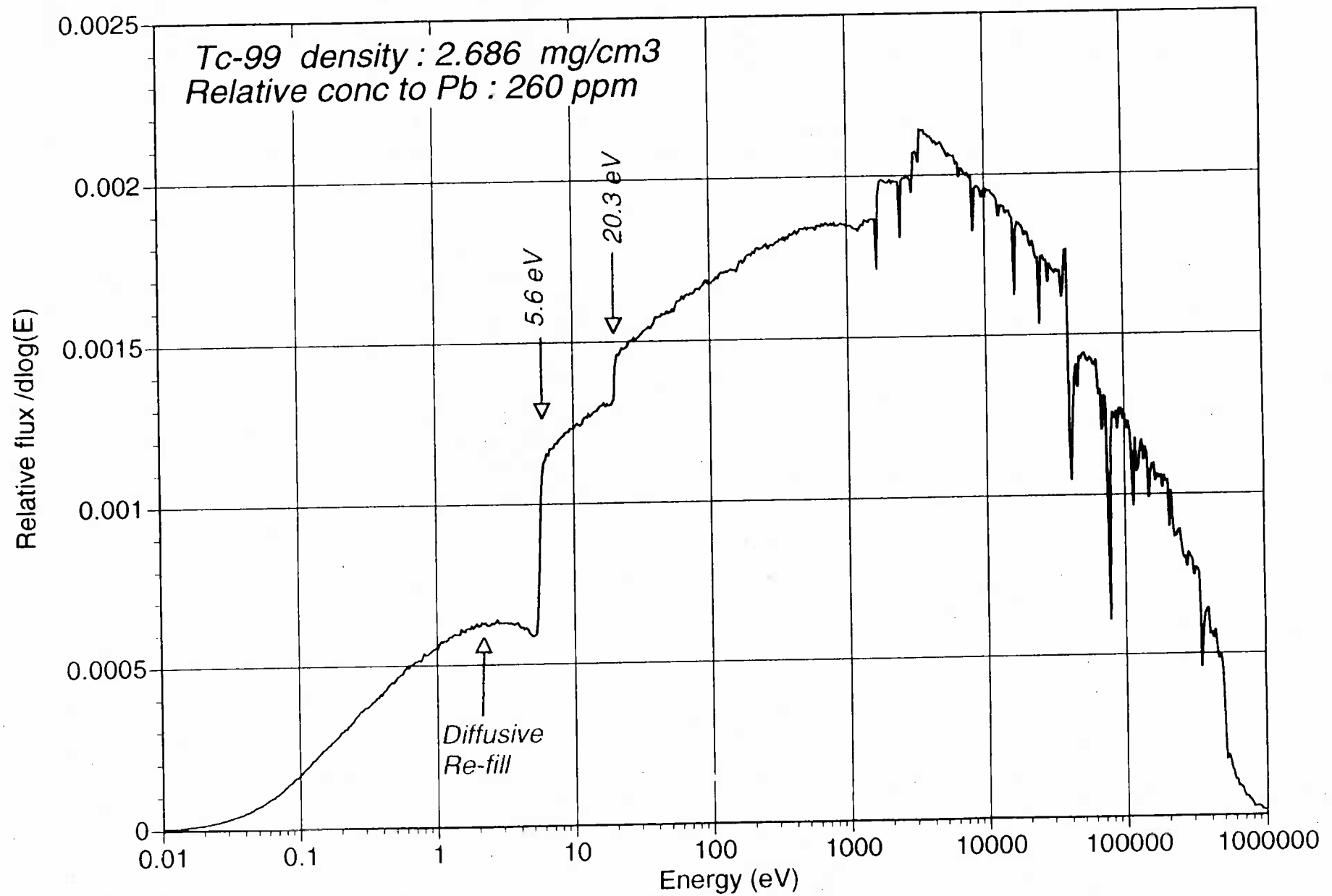
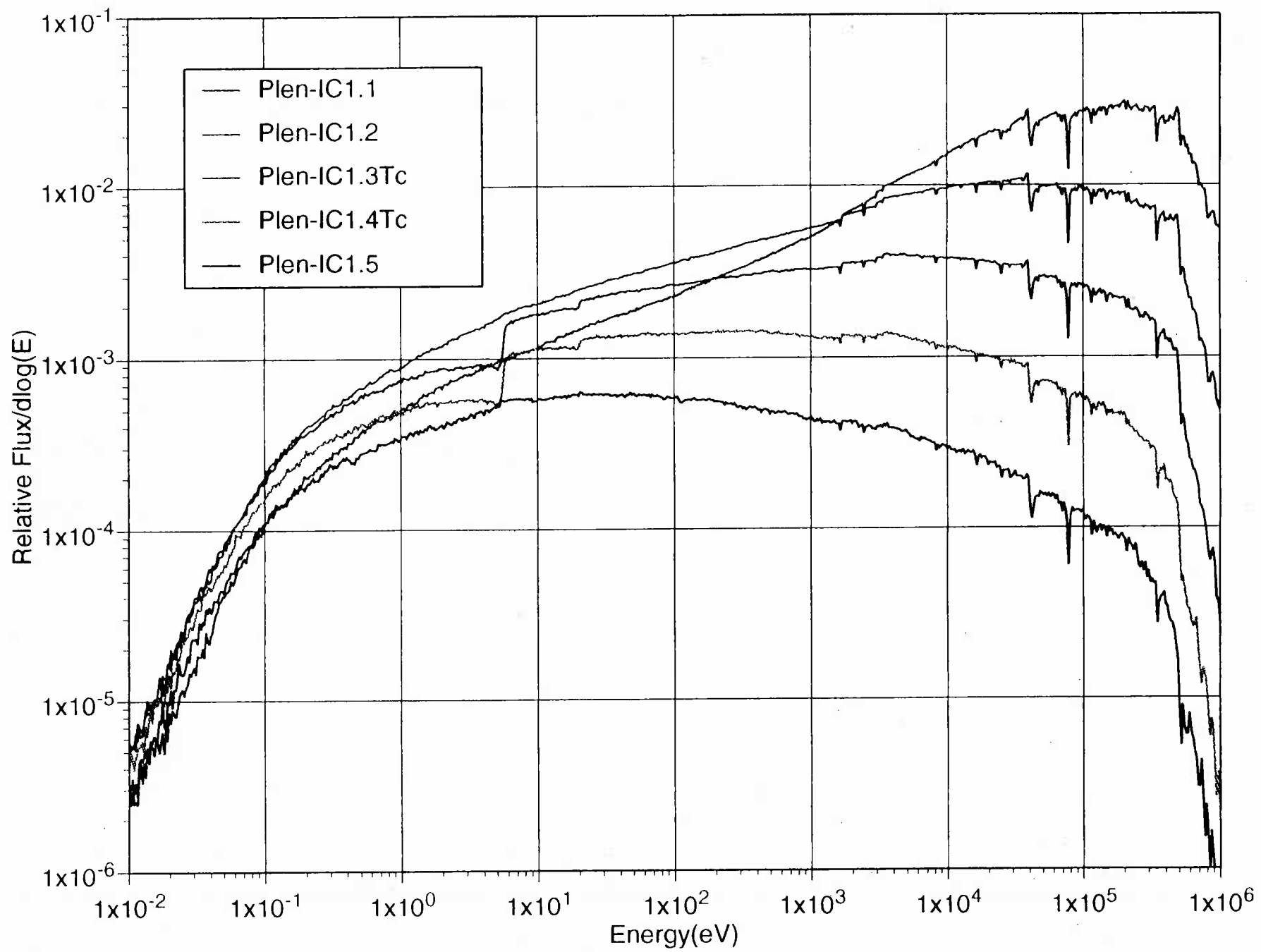


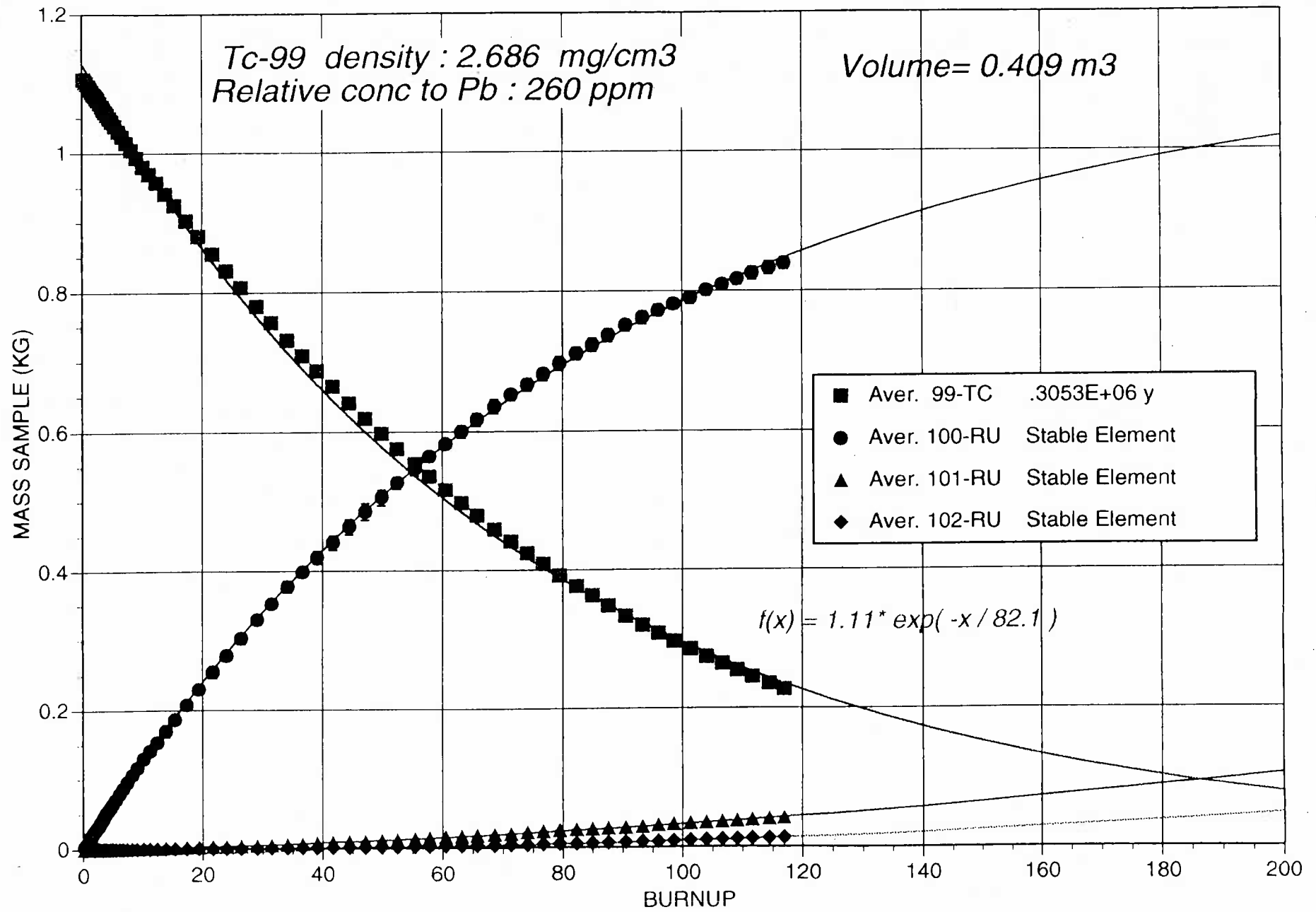
Figure 6.3



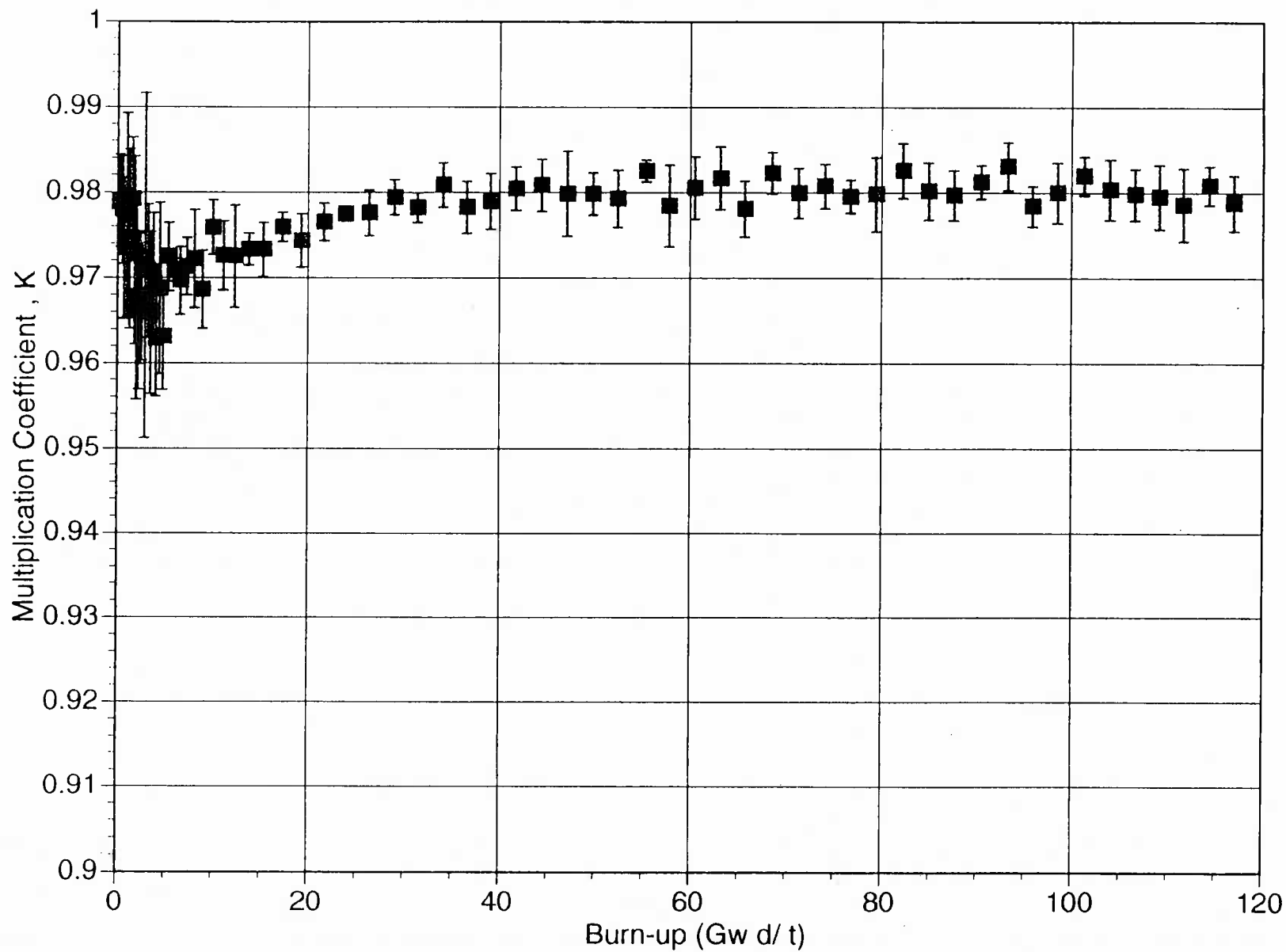
Flux in Technetium Sample Incinerator

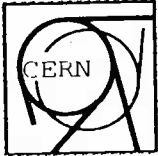






Energy Amplifier with Technetium Incineration





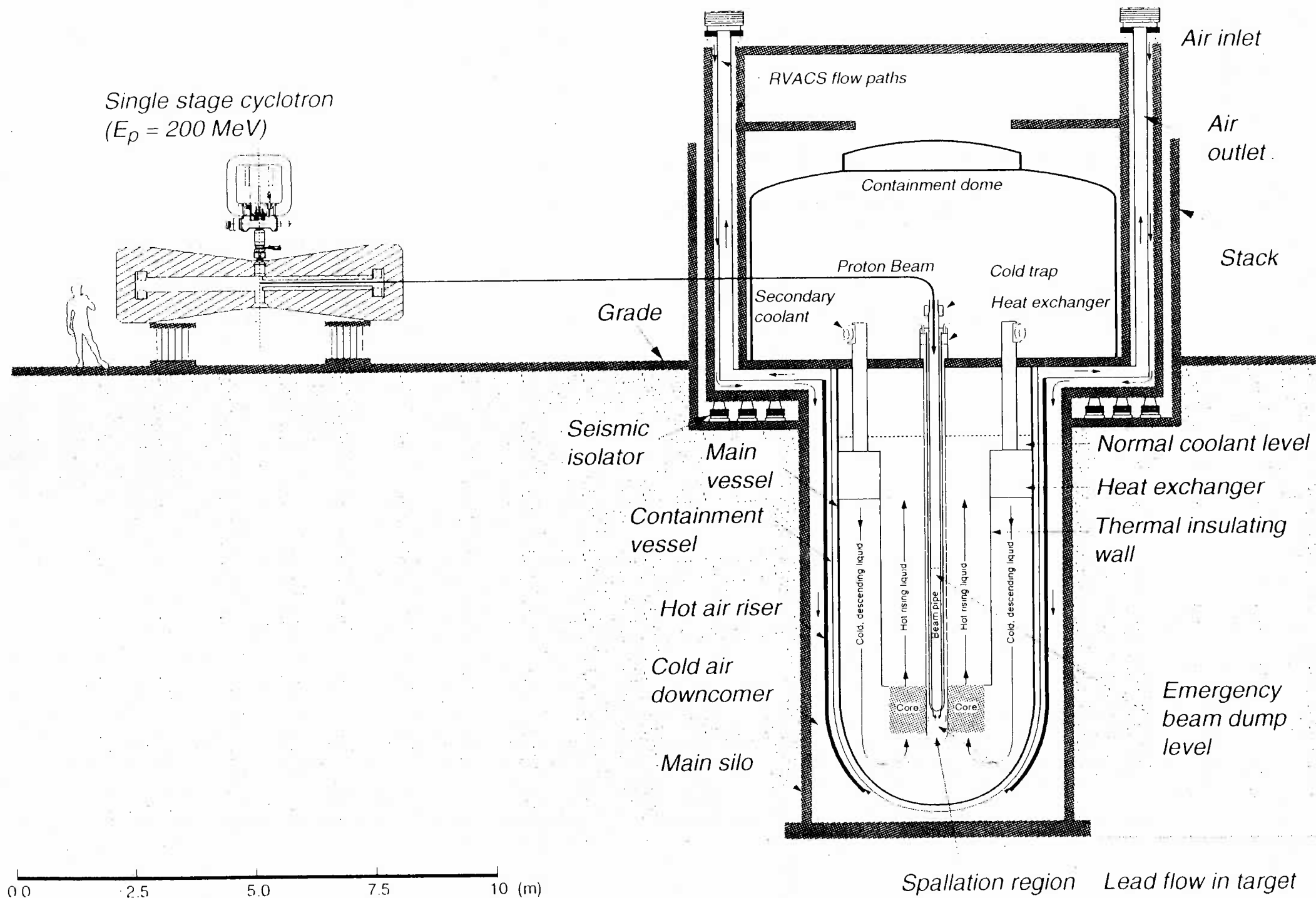
1)-La prochaine étape

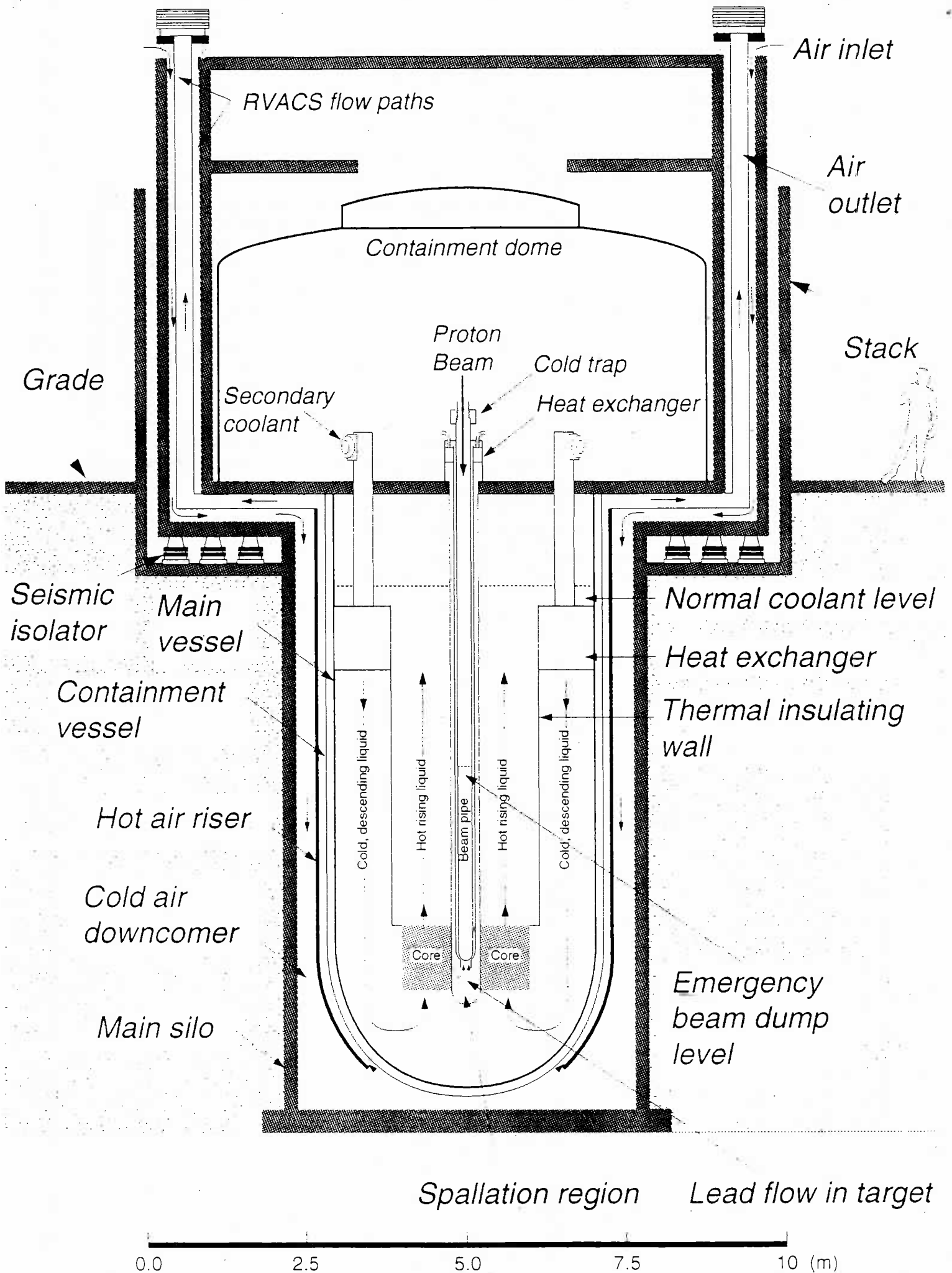
Une machine de la taille d'un réacteur de recherche, capable de démontrer toutes les caractéristiques de l'AE

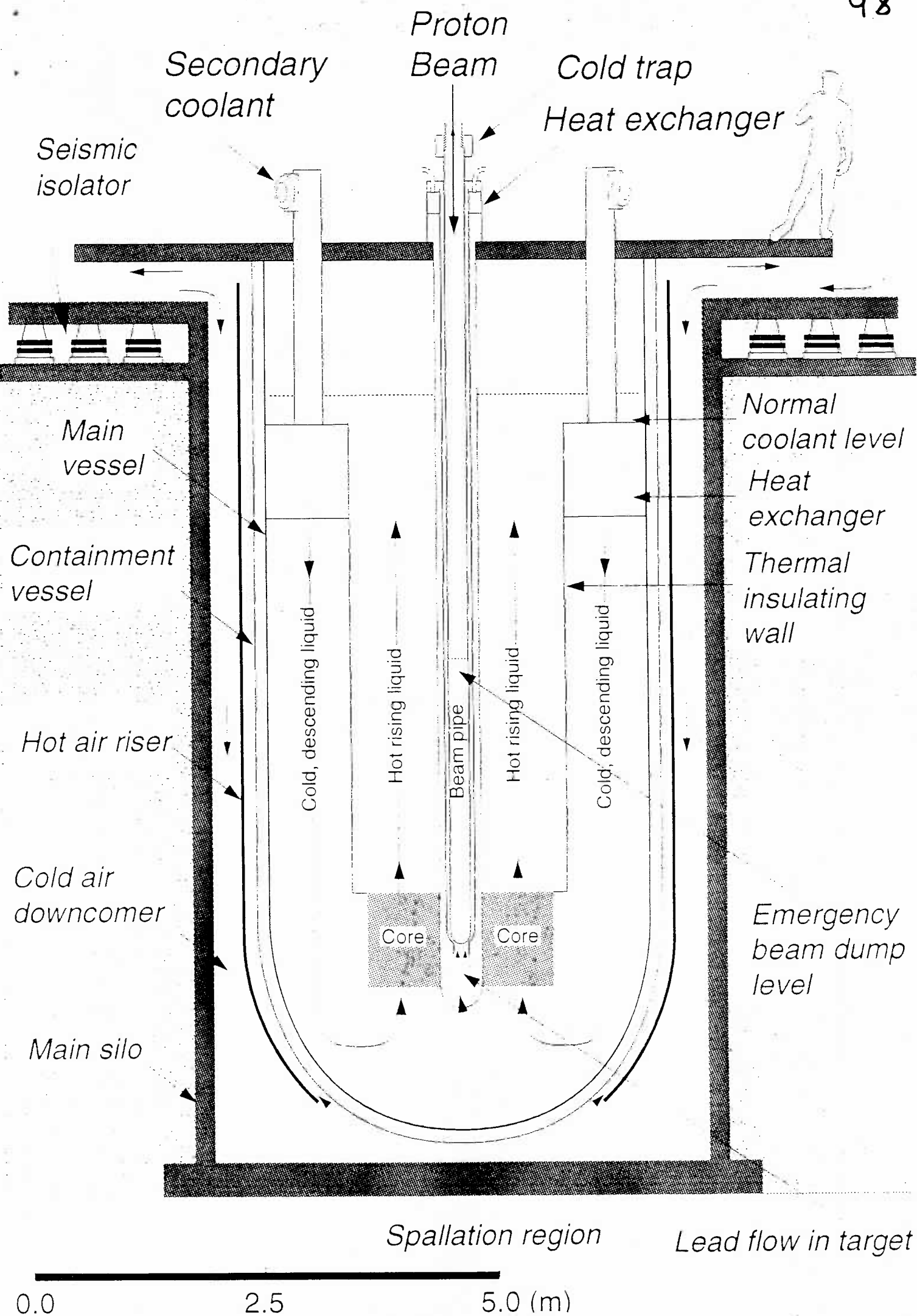
- Puissance de l'ordre de 100 MW,
- Accélérateur de simplicité maximale et de haute efficacité. Les paramètres choisis sont $E = 200 \text{ MeV}$ et $i = 10 + 20 \text{ mA}$
- Démonstration complète des particularités de l'AE, y compris la cible et le refroidissement au plomb, le refroidissement par convection et les propriétés de sûreté passive.
- Combustibles: $[U^{238}-20U^{235}] + \text{Th}$, $U^{233} + \text{Th}$ ou mélanges Pu-Th

Le but de cette installation est de démontrer:

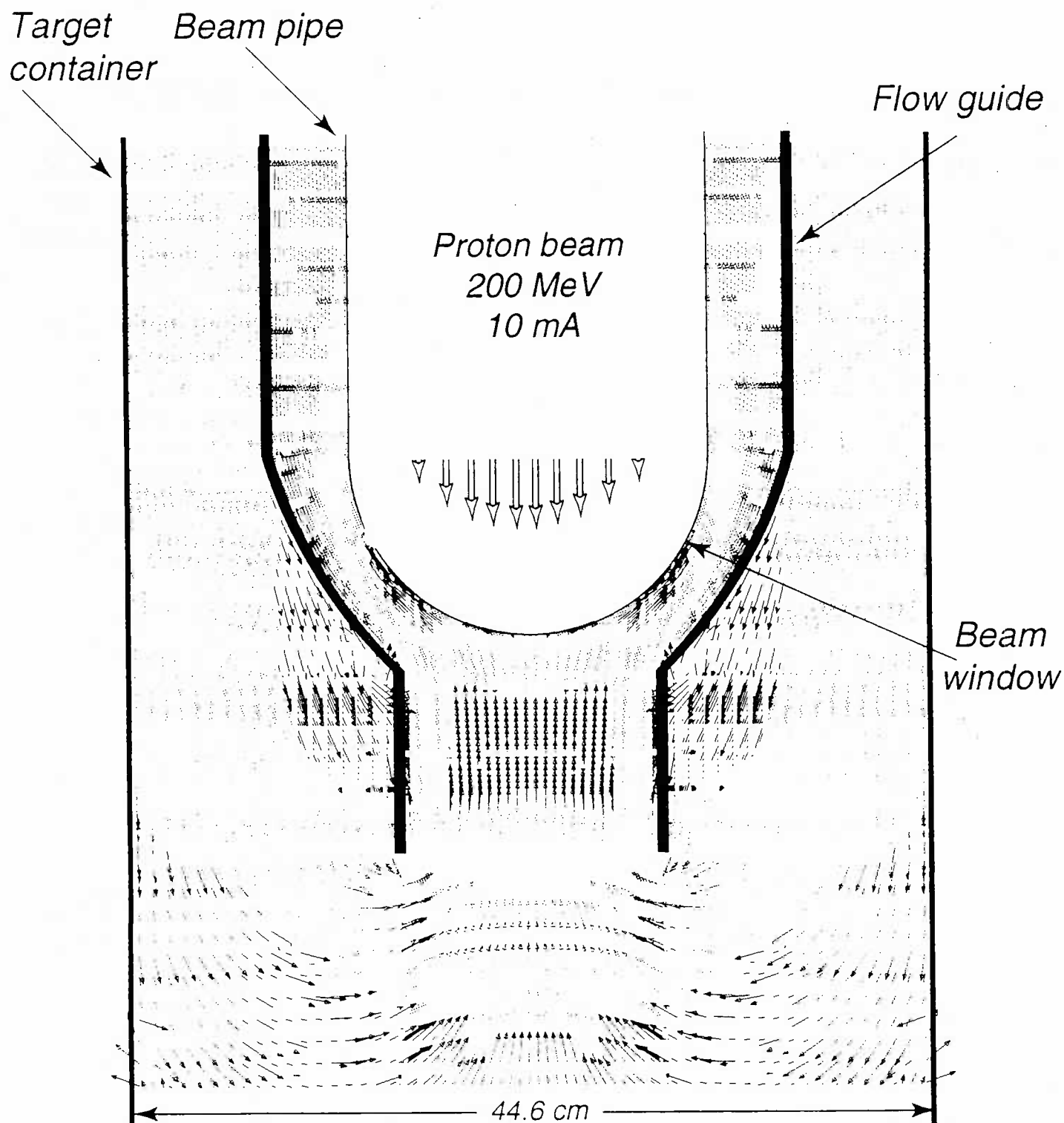
- l'opération complète d'une unité produisant de l'énergie et d'un incinérateur de Pu
- la compétitivité économique avec un REP ($\leq 4 \text{ c/kWh}$)
- les propriétés uniques de sûreté
- Les procédures de retraitement/régénération du combustible







Details of the Energy Amplifier Target



16-Nov-96

VELOCITY MAGNITUDE

M/S

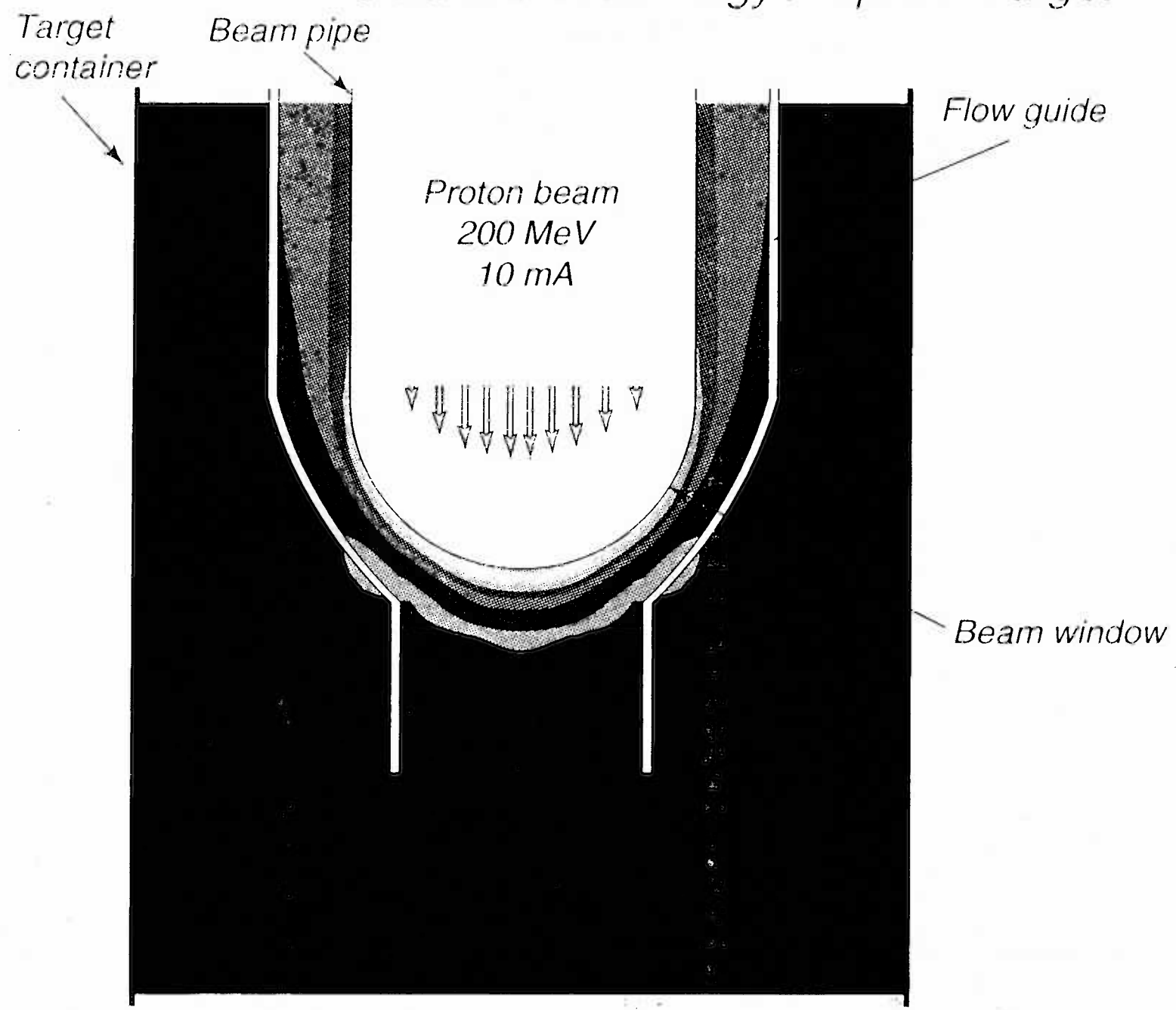
ITER = 753

LOCAL MX= 1.209

LOCAL MN= 0.1764E-03

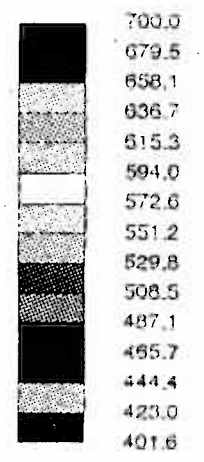
————	1.209	————	0.6048
————	1.123	————	0.5184
————	1.037	————	0.4320
————	0.9503	————	0.3457
————	0.8639	————	0.2593
————	0.7775	————	0.1729
————	0.6912	————	0.8655E-01
————	0.6048	————	0.1764E-03

Details of the Energy Amplifier Target



STAR
D
 PROSTAR 2.30

16-Nov-96
 TEMPERATURE
 (CELSIUS)
 ITER = 753
 LOCAL MX= 700.8
 LOCAL MN= 401.6



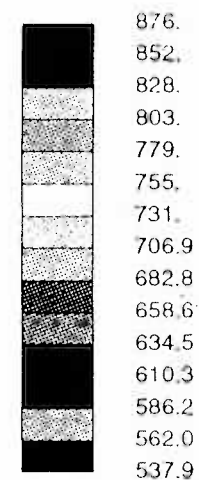
Energy Amplifier beam window

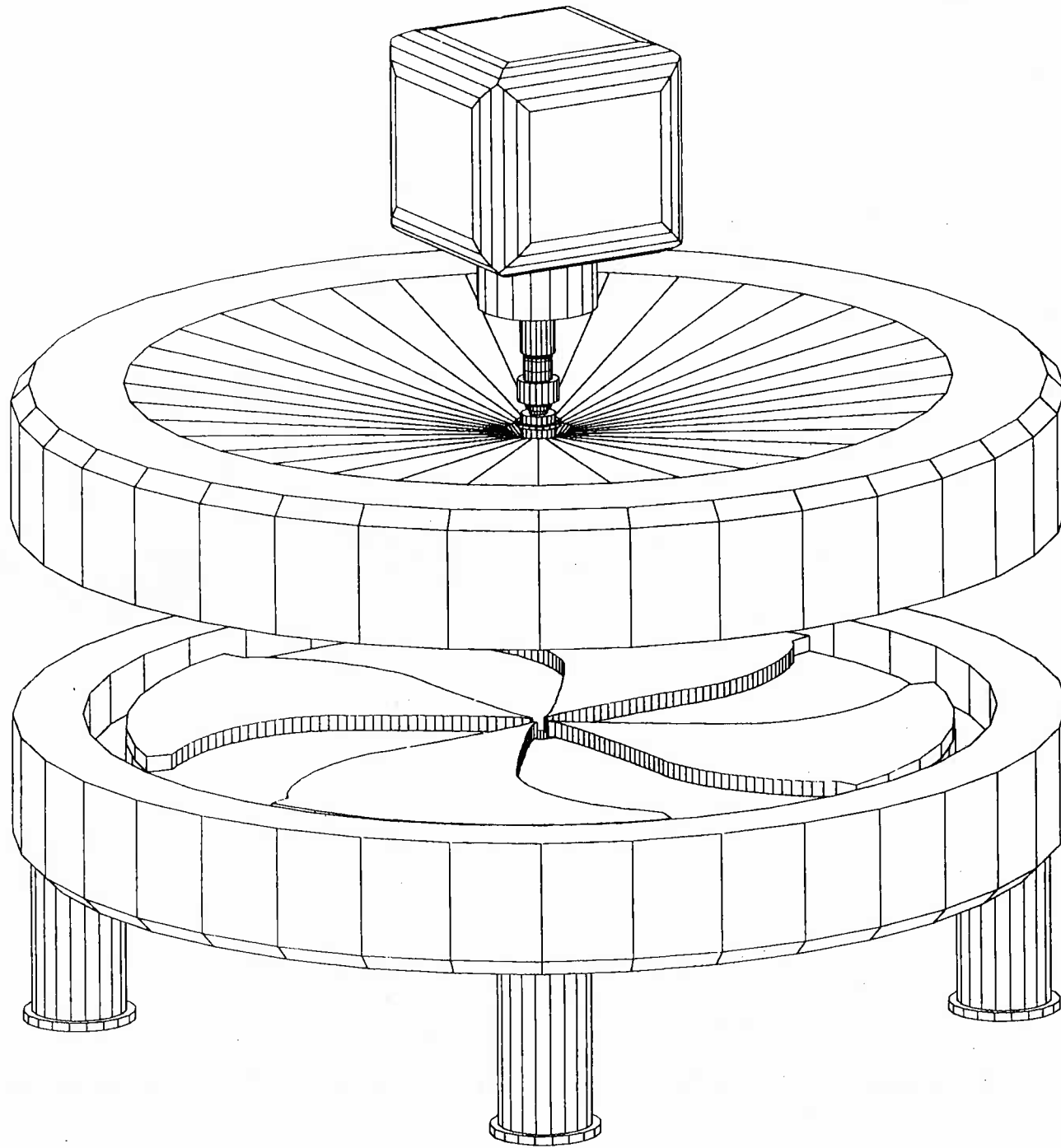


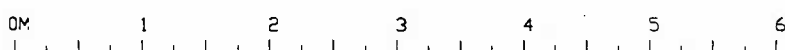
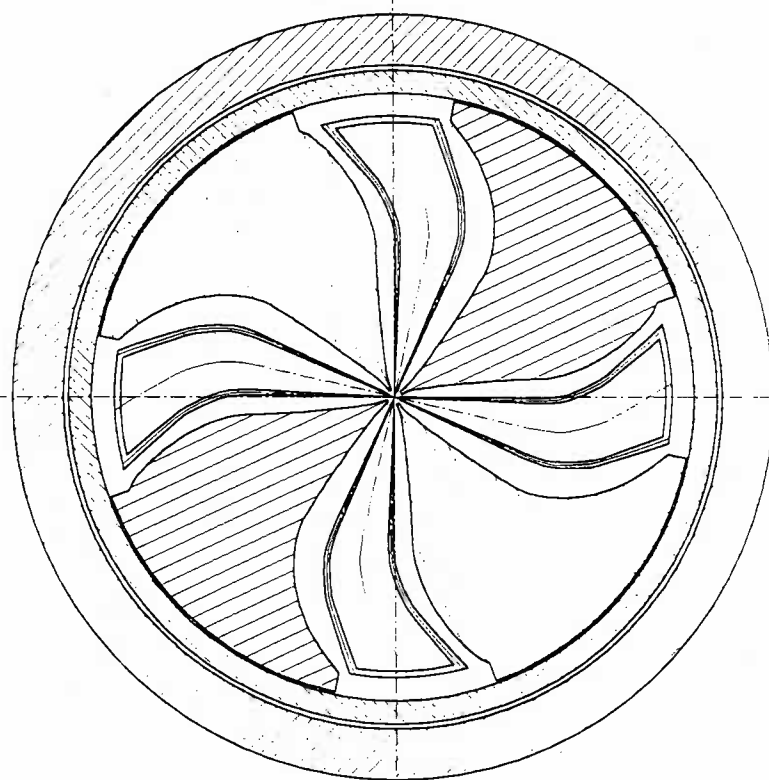
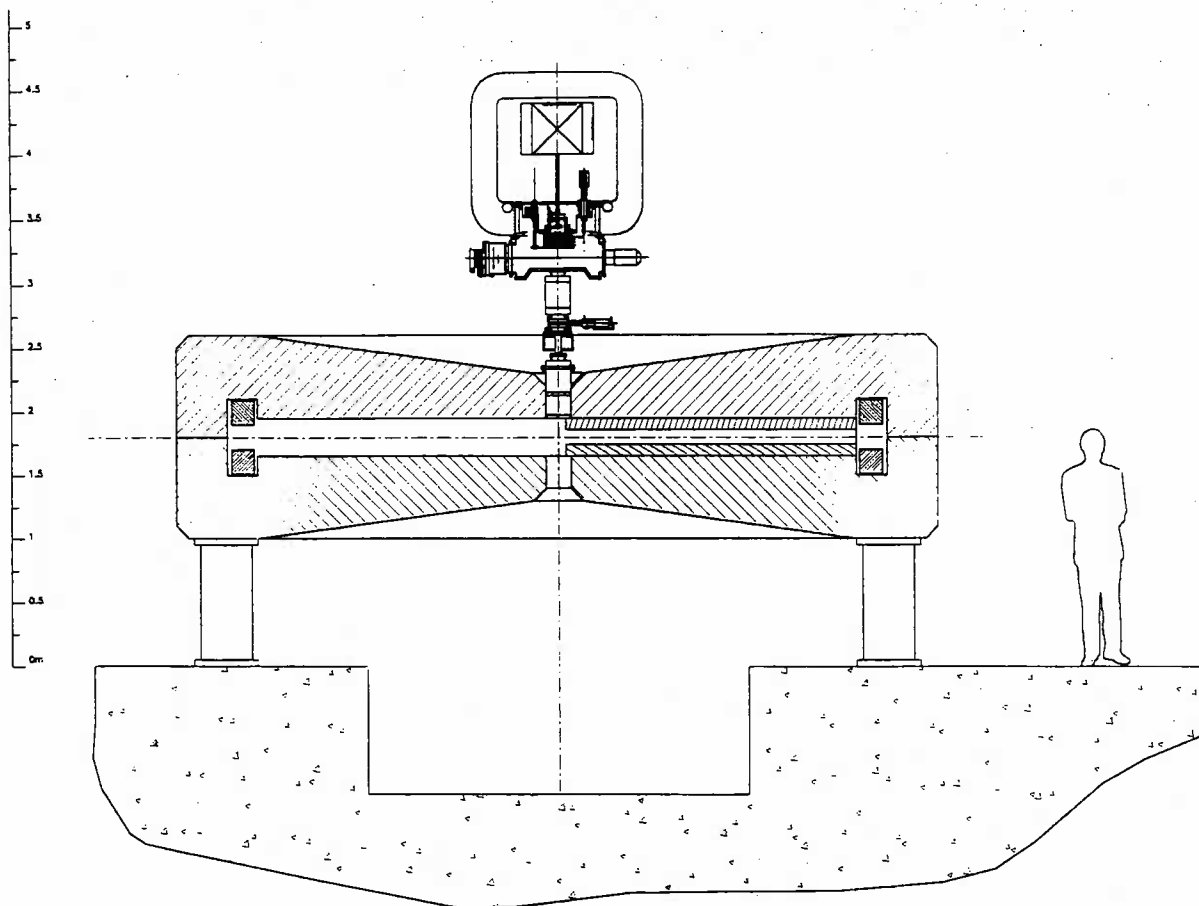
PROSTAR 2.30

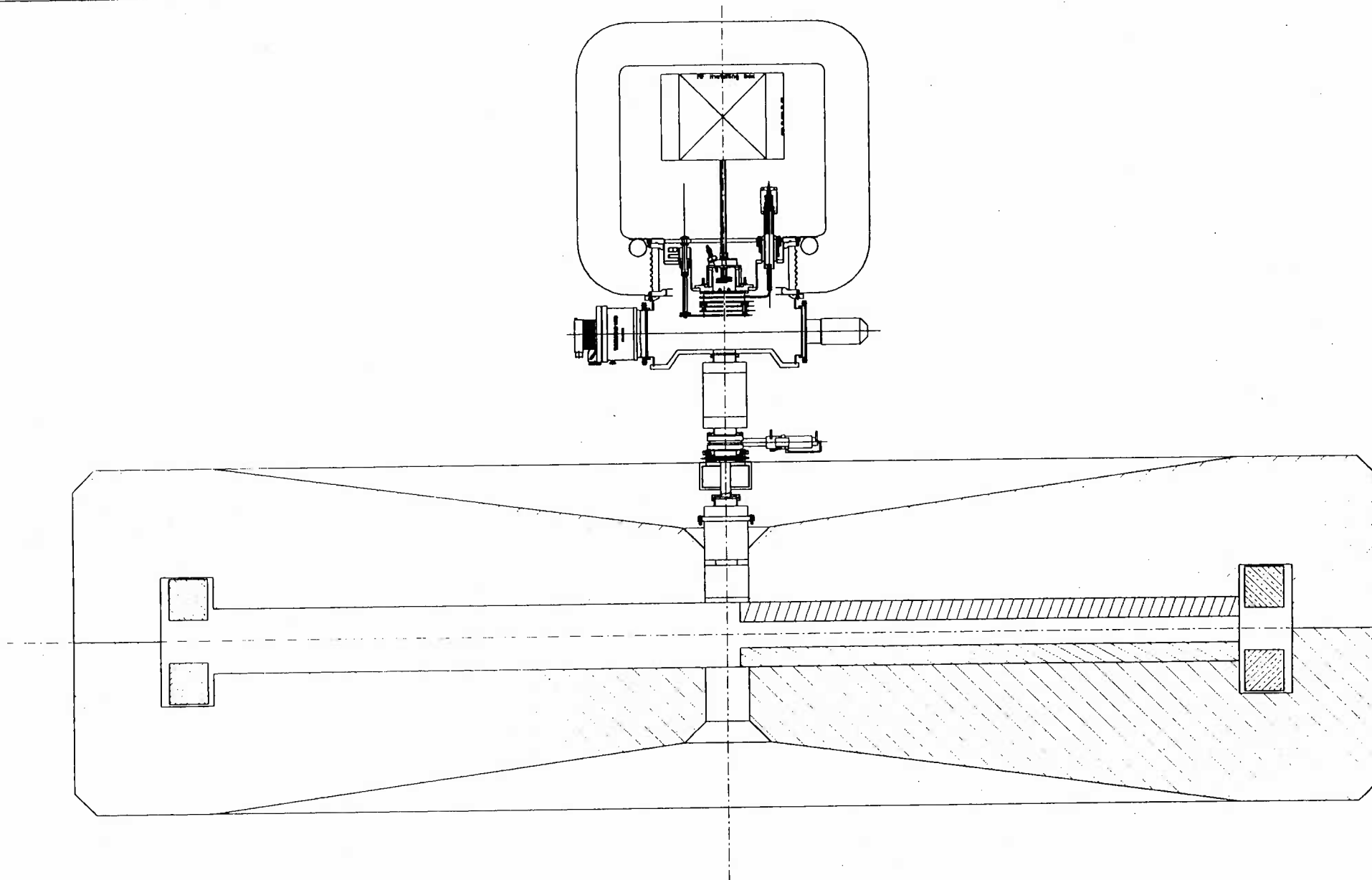
Proton beam
200 MeV -10 mA

16-Nov-96
TEMPERATURE
(CELSIUS)
ITER = 753
LOCAL MX= 876.
LOCAL MN= 537.9









Caracteristiques principales du Cyclotron 200MeV

Energie Injection	100 KeV
Energie Extraction	190 a 200MeV
Intensite	10 mA
Transmission des H-	> 99 %
Radiofrequence	88 MHz
Harmonique	8
Tension pic HF	100 KVolts
Pertes cuivre par cavite	140 KWatts
Nombre de cavites	4
Hauteur max aimant	160 cm
Rayon ext. aimant	340 cm
Poids aimant	360 tonnes
Entrefer secteur	12 cm
Entrefer vallee	30 cm
Champ max secteur	0.95 Tesla
Rayon polaire secteur	271 cm
Champ max vallee	0.4 Tesla
Rayon interne bobine	273 cm
Rayon externe bobine	293 cm
Ampere-tours/pole	55000 At

FM 16 Nov 96

Efficacite du cyclotron 200 MeV H-

$$\eta = \frac{P_{Beam}}{P_{Magnet} + P_{injax} + P_{HF}}$$

$P_{Magnet} = 90 \text{ KWatts}$

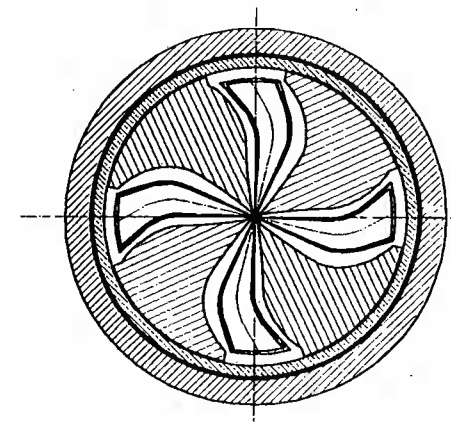
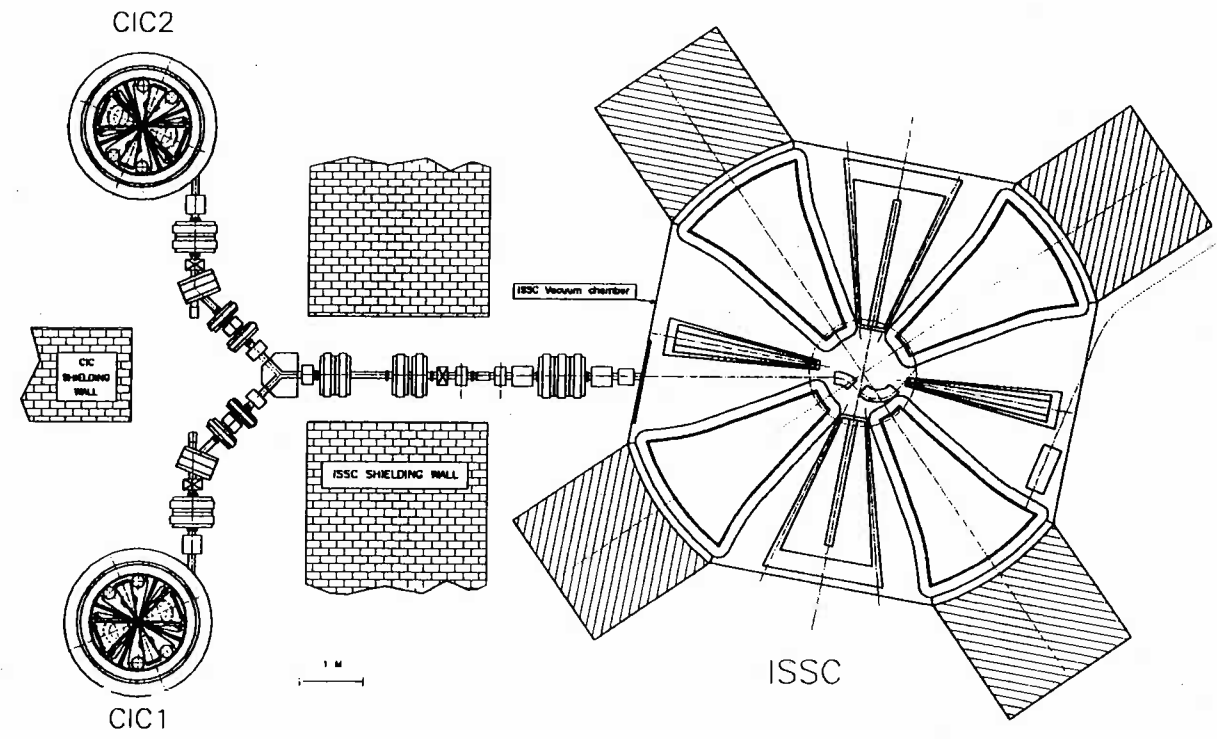
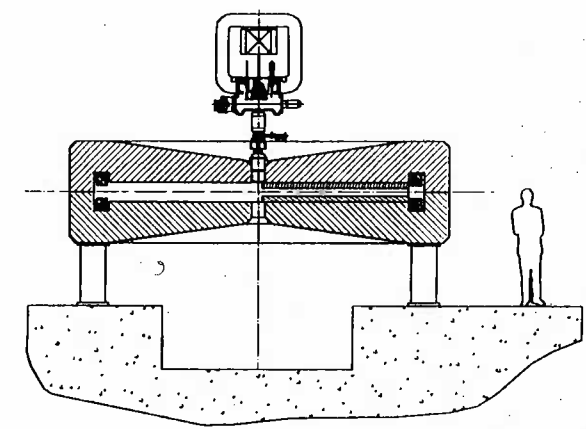
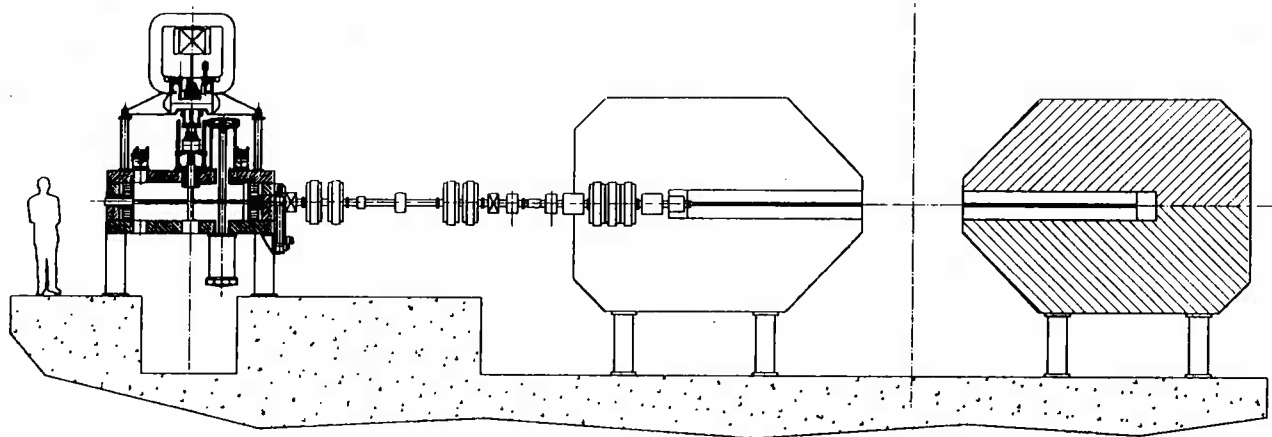
$P_{injax} = 50 \text{ KWatts}$

$P_{RF} = 4 (\text{Losses} + P_{beam}/4) / \varepsilon$

where $\varepsilon = \text{D C to RF conversion efficiency} = 70 \%$

Losses = RF Losses in the copper = 120 KWatts/ cavite

Pour $I = 10 \text{ mA}$, $P_{beam} = 2.0 \text{ MWatt}$, $\eta = 52.6 \%$



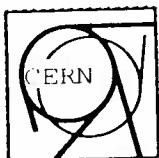
Main Parameters of the Energy Amplifier

<i>Generic Parameters</i>	Prototype	Full Scale	Units
Gross Thermal Power/unit	75	1500	M W
Coolant	Liq. Lead	Liq. Lead	
Sub-criticality factor k, (nominal)	0.98	0.98	
Doppler Reactivity Coefficient, ($\Delta k/\Delta T$)	- 5.2 10^{-6}	- 1.37 10^{-5}	
Void coefficient (10% Core voided) $\Delta k/(\Delta \rho/\rho)$	0.0509	0.010	
Nominal energetic Gain	40	120	
Accelerator electrical consumption	≈ 4	≈ 30	MWe
<i>Main Vessel</i>			
Height, Diameter	10, 4	30, 6	m
Material, Weight	Steel, 35	Steel, 515	ton
<i>Fuel Core , Pins and Sub-Assemblies</i>			
Initial fuel mixture, Oxide/Metal	Th-(U,Pu)	Th-(U,Pu)	
Initial fuel mass	5	30	ton
Specific power	13.3	52.8	W/g
Power density	118	523	W/cm ³
Pin outer diameter, length	0.82 , 100	0.82 , 150	cm
Pin cladding material	HT-9	HT-9	
Max. Radiation Damage	6	34	dpa/y
Sub-Assembly Configuration	Hexagonal	Hexagonal	
No of pins/Sub-Assembly	127	331 , 397	
No Sub-Assembly units - fuel / breeder	120	120 / 42	

Main Parameters of the Energy Amplifier (cont.)

<i>Proton Beam , Transport and Spallation Target</i>	Prototype	Full Scale	Units
Accelerator type	Cycl.	Cycl./Linac	
Accelerator overall efficiency ¹	≥ 50%	≈ 50%	
Kinetic energy	0.2	1.0	GeV
Nominal current	10	12.5	mA
Spallation Target material	Liq. Lead	Liq. Lead	
Separated Spallation Source	yes	no	
Beam window material	W-Re (26)	W-Re (26)	
Heat deposition in the window	100	90	kW
Window expected lifetime	≈ 1	≥ 1	year
Lead coolant maximum speed	1.2	2.2	m/s
<i>Primary cooling system</i>			
Approximate weight of the coolant	1212	9350	ton
Pumping method	Nat. Conv	Nat. Conv	
Height convection column	6	25	m
Decay heat removal	RVACS	RVACS	
Core Temperature Inlet, Outlet	400 , 495	400 , 600	°C
Coolant speed in Core, average	0.32	1.5	m/s

¹Beam power / Mains Load

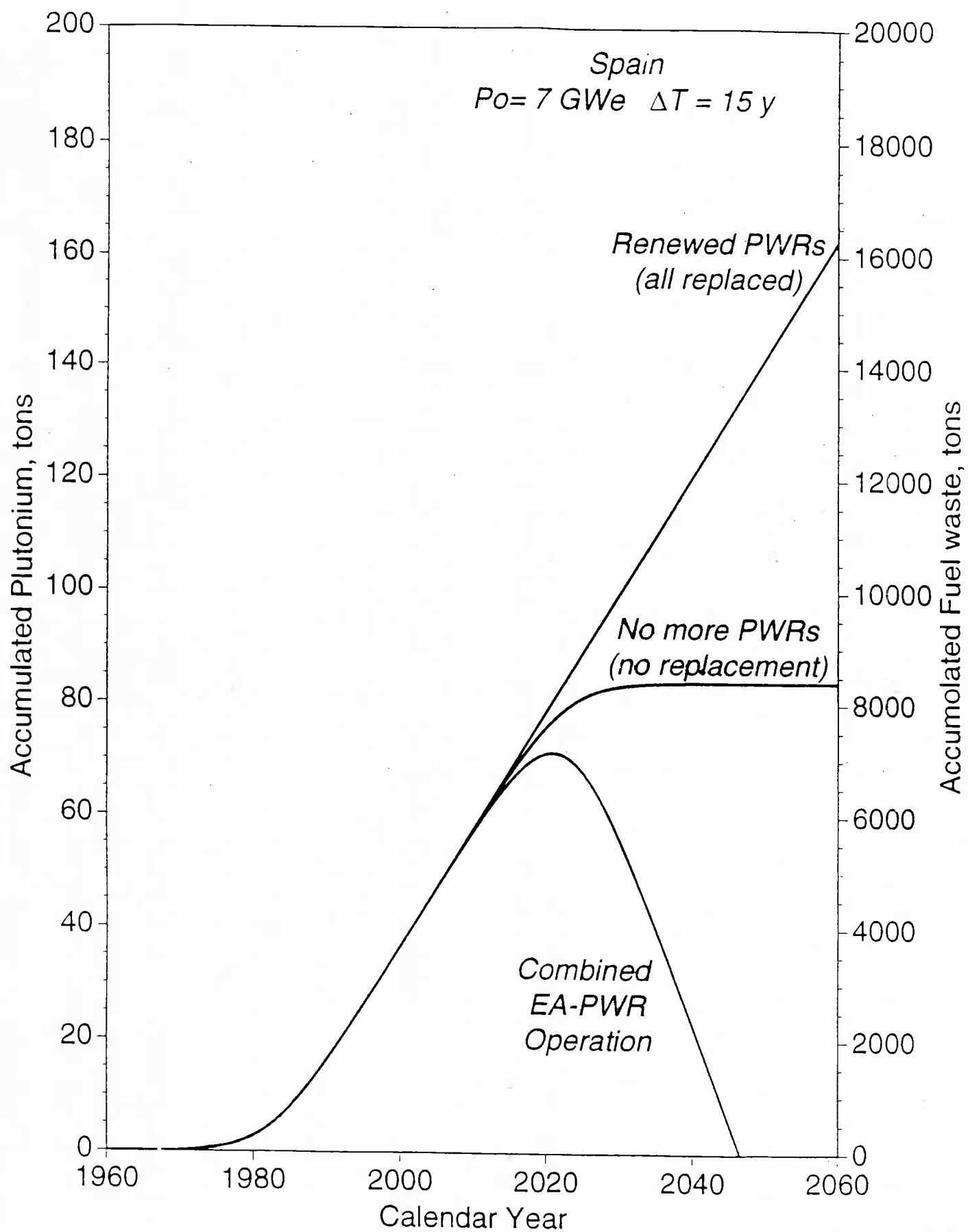


Une machine à l'échelle industrielle

110

- Il n'y a aucun doute que cette "petite" machine, une fois portée à sa puissance maximale ($\approx 200\text{MW}$) peut trouver un marché.
- Néanmoins, le marché le plus important sera celui d'une machine de beaucoup plus forte puissance, par exemple pour la production électrique ou l'incinération des actinides.
- L'expérience acquise avec la petite machine pourra sans nul doute être étendue à des puissances plus élevées, telles que décrites dans notre "Projet Conceptuel"
- Pour le moment, nous nous focalisons sur le réemploi du système accélérateur de LEP 200, actuellement en fonctionnement au CERN et qui termine sa carrière à la fin de l'an 2000.
- Avec des modifications mineures, cette machine existante peut servir à accélérer des protons (de l'ordre de $20\text{ mA} @ 2.5\text{GeV} = 40\text{ MWatt}$)
- La perspective d'utilisation pour cette prochaine étape – qui pourrait être déployée en Espagne – pourrait être:
 - 1) la production de quelque 1.8 GWatt d'énergie électrique
 - 2) l'élimination en 20 ans environ des surplus (présents et futurs) de Pu espagnol.

21 novembre 1996

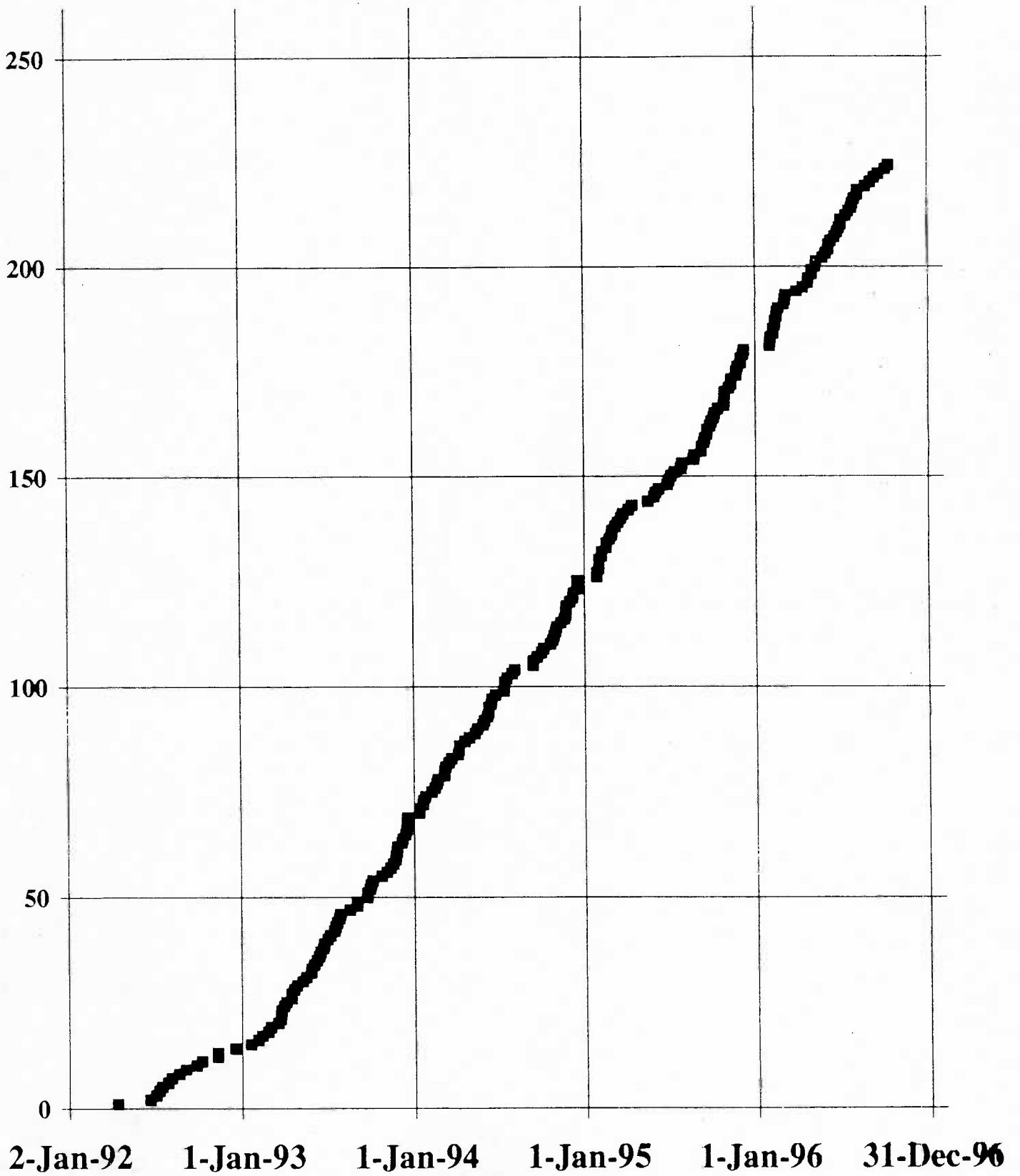




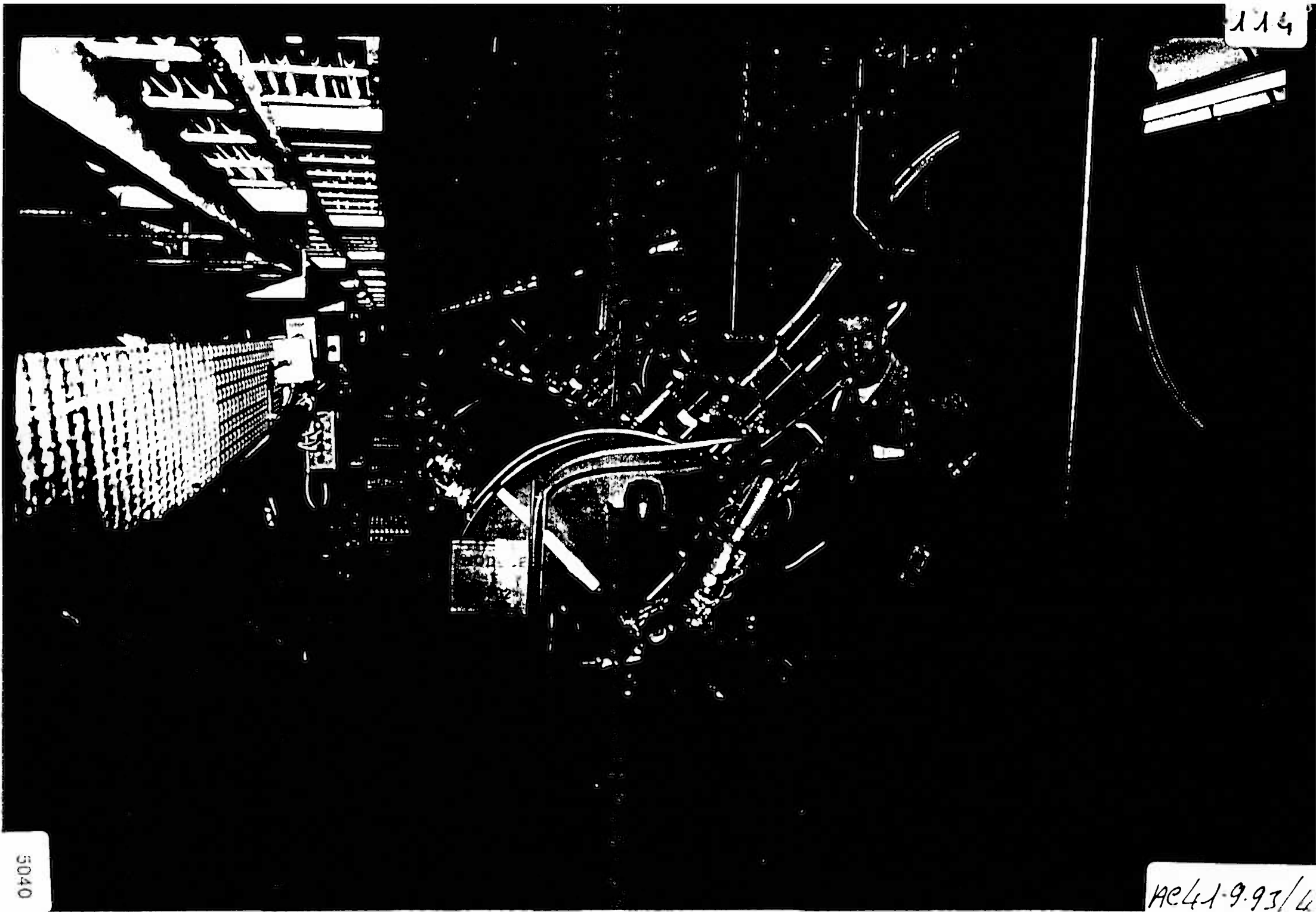
6951

Ac 17-4-95/A

Total number of accepted cavities



114

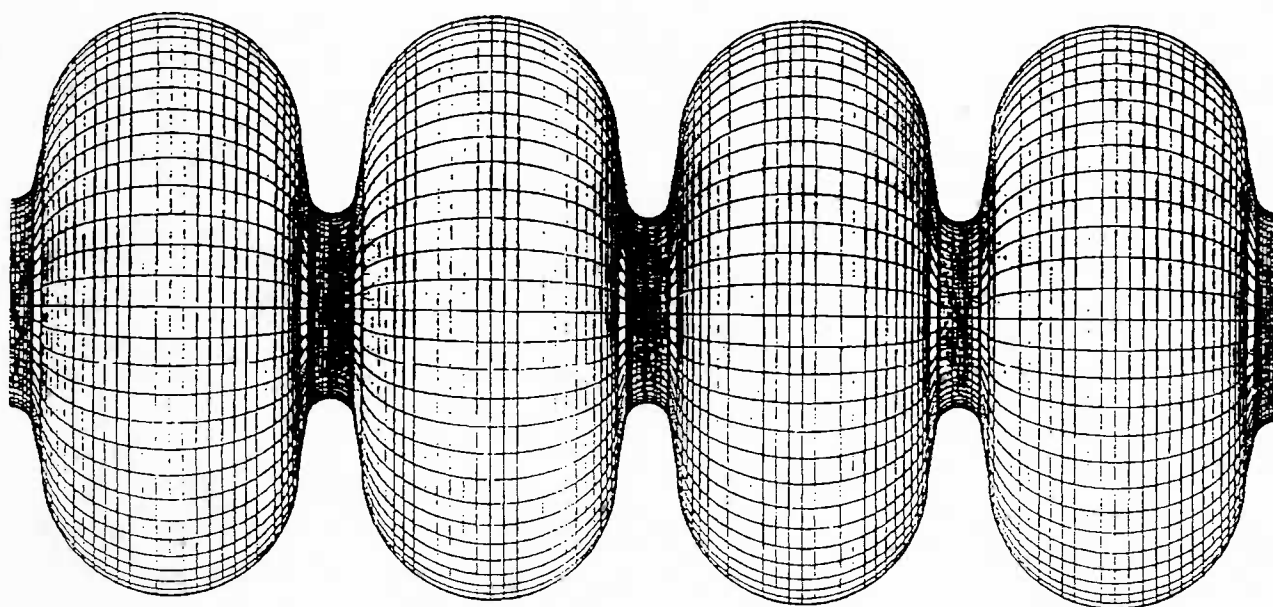


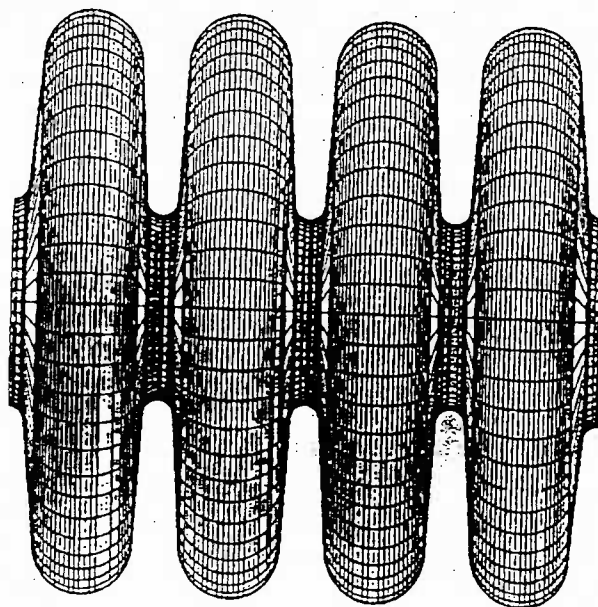
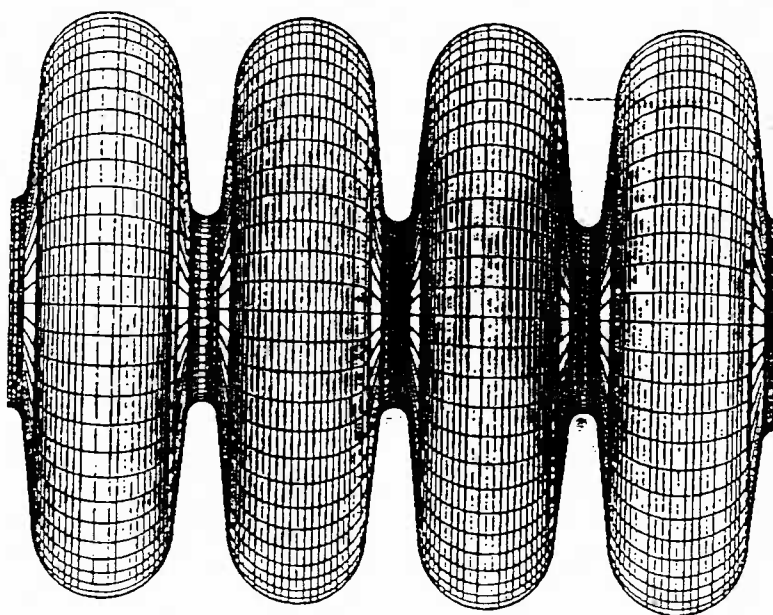
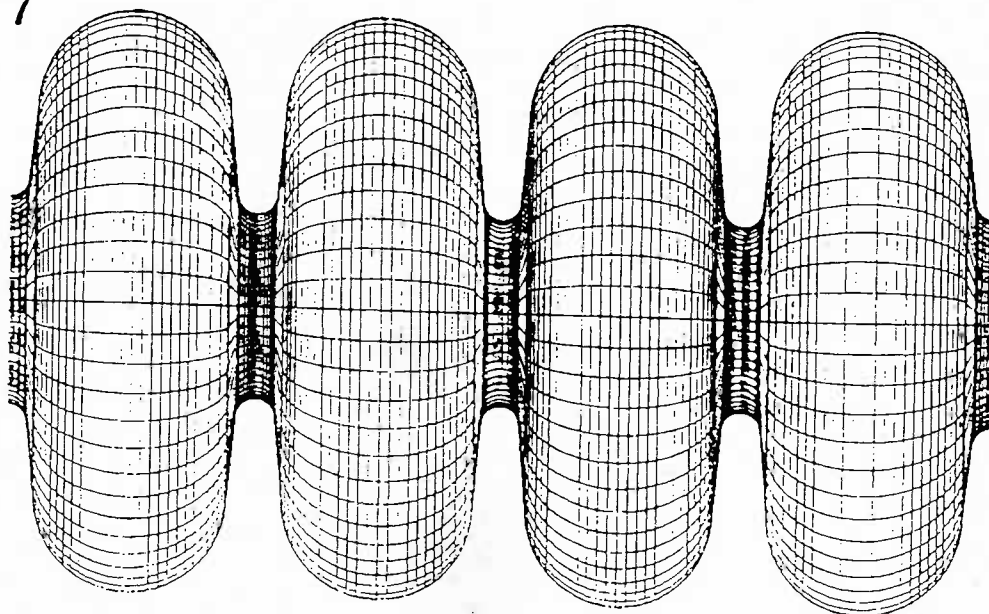
5040

AC41-9.93/4

LEP200 CAVITY

$\beta=1$ 352MHz



EA-1 $\beta=0.48$ EA-2 $\beta=0.61$ EA-3 $\beta=0.77$ 

117

10 cm

9969

Ac 18-11-98/



L'énergie, "un mal nécessaire"

118

- L'Energie, au même titre que les matières premières, est une base de notre société technologique. Son utilisation a crû constamment depuis les origines de l'humanité. Sans doute la consommation d'énergie va fortement augmenter dans les décennies à venir car:
 - La population mondiale continue à croître ➡ ➡ elle a doublé depuis 1968
 - Des milliards d'êtres, surtout dans les PVD aspirent à une vie meilleure ➡ ➡ il y a une énorme disparité dans la consommation d'énergie per capita
- L'utilisation de l'électricité va croître fortement. Le Conseil Mondial de l'Energie prévoit que la consommation mondiale augmentera de 50 -75% d'ici à 2020. ➡ ➡ Suède :15 000 kWh annuels per capita; Bangladesh et Tanzanie: 100 kWh annuels per capita
- L'énergie et l'électricité doivent être produites et utilisées de façon plus efficace: condition nécessaire, mais pas suffisante. Nous pourrons rouler plus loin avec un litre d'essence, mais nous aurons davantage d'autos, les ampoules électriques auront un meilleur rendement, mais nous aurons davantage d'ampoules, etc.
 - ➡ ➡ Il y aura une meilleure efficacité, mais aussi une forte augmentation dans l'utilisation de l'énergie.



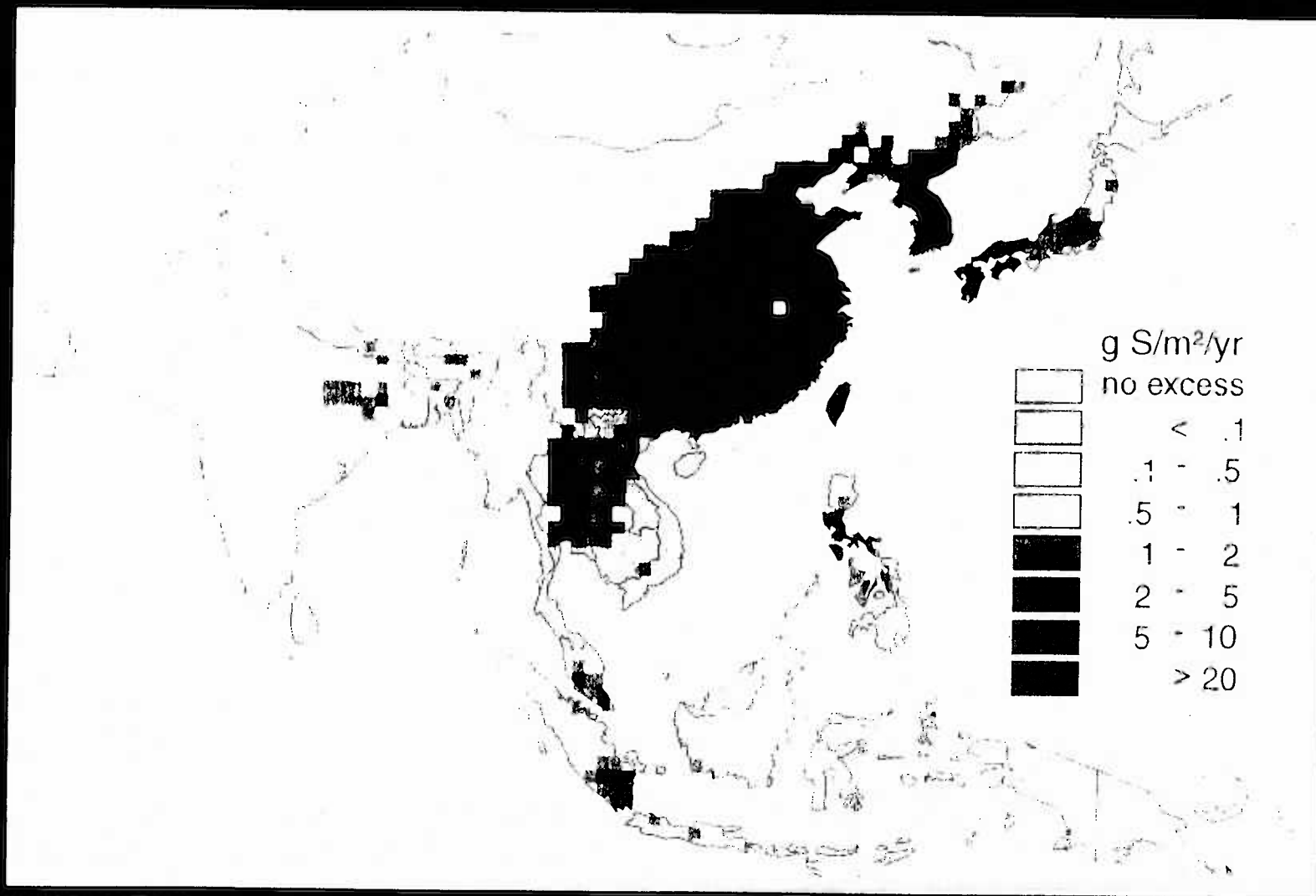
"From Greenhouse to Dreamhouse"

119

- Jusque là point de désaccord. Ceux-ci surgissent dès que l'on veut savoir d'où viendront cette énergie et cette électricité et quels seront les rôles des énergies (1) fossiles, (2) renouvelables classiques (hydro), (3) renouvel. nouvelles (biomasse, solaire..) et (4) nucléaire
 - ➡ ➡ L'énergie la moins chère est la meilleure énergie: tolérance résignée aux énergies fossiles?
- Les préoccupations sur l'environnement ont commencé à ajouter de nouvelles dimensions aux discussions sur l'énergie. Les plus importantes concernent le CO₂, qui, avec d'autres gaz (fuites de méthane au cours du transport), contribuent à un réchauffement global. (La chaleur de l'effet de serre = 100 fois la chaleur produite)
 - ➡ ➡ IPCC : prévoit un changement dans le climat global < 100 ans
 - La recette dominante (Rio, Berlin etc.): réduire les émissions de CO₂ par (1) des économies d'énergie (2) l'utilisation des énergies renouvelables.
 - Gaz augmentera de +55%, Charbon de +66 % de 1992 à 2010 (OECD, 1995)

La tendance réelle ne plaide pas en faveur de l'abstinence dont parlent les Ministres et les Conférences.

EXCESS SULFUR DEPOSITION FOR AN UNABATED COAL SCENARIO



IIASA

ECS, 1995



Absence d'une politique cohérente

Il faut choisir entre nos différentes PEURS:

- Avons nous peur des déchets nucléaires et des accidents nucléaires au point de renoncer à utiliser l'énergie nucléaire pour réduire de façon significative la combustion des fossiles ?
- Avons nous tellement peur de l'effet de serre, que nous sommes prêts à vivre avec l'énergie nucléaire, éventuellement transformée par de nouveaux développements dans le futur (AE)
- Avons nous peur et de l'énergie nucléaire et des énergies fossiles au point d'être prêts à payer sensiblement plus cher pour notre énergie et à couvrir d'énormes surfaces avec des éoliennes, des cellules solaires et des arbres à croissance rapide, admettant par là même que ces sources d'énergie soient aussi inoffensives pour l'environnement que le prétendent leurs promoteurs ?

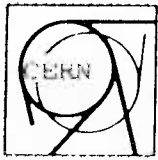
Jusqu'à présent nous pataugeons. Il n'y a pas de réponse claire. Plusieurs exemples concrets suggèrent toutefois une tolérance résignée aux énergies fossiles...



Un rôle renouvelé pour l'énergie des noyaux ?

La solution de ce dilemme doit venir de nouvelles idées et de nouvelles solutions. Je crois que l'énergie à partir des noyaux, à la différence de l'énergie chimique, pourrait être maîtrisée d'une façon plus acceptable pour l'environnement:

- Nombreux sont ceux qui ont cru que la Fusion pourrait être la solution aux besoins croissants en énergie. Mais de nos jours, nous sommes de moins en moins convaincus que nous puissions nous acheminer sans coup férir vers un Réacteur à Fusion:
 - L'énergie de Fusion pourrait être disponible que dans un futur lointain (≥ 2050), bien trop tard pour avoir un impact sur les changements climatiques .
 - Les machines à Fusion seront des objets compliqués, coûteux et délicats. Elles seront mal adaptées à la fourniture d'énergie aux PVD où les besoins sont les plus grands.
 - La Fusion sera trop coûteuse pour présenter une alternative compétitive avec les Fossiles, principale raison de la stagnation de l'énergie nucléaire classique.
- La Fusion Froide doit encore passer le cap d'une phase nécessaire de confirmation de ses résultats avant que se pose l'éventualité de son application, qui demeure pour le moins problématique.



Conclusion

La fission, débarrassée des inconvénients qui ont amené l'industrie de l'énergie nucléaire à sa présente stagnation, est à mon avis notre meilleure chance, à condition:

- de réduire son impact sur l'environnement et de résoudre le problème des déchets de durée de vie à l'échelle géologique, l'objet de craintes et d'une large opposition du public.
- d'améliorer de façon radicale la sûreté nucléaire.
- de couper le lien entre production d'énergie et prolifération nucléaire, en particulier parce que la demande d'énergie vient surtout des PVD.
- d'en diminuer les coûts, afin de la rendre compétitive (fossiles).

Pour accomplir ces objectifs, nous avons besoin d'un programme vigoureux de Recherche et Développement, exploitant les avantages d'idées nouvelles et la fertilisation entre disciplines: L'AE est un excellent candidat pour la fission nucléaire de deuxième génération.