



La naissance du nucléaire civil aux USA

Yves FOURNIER



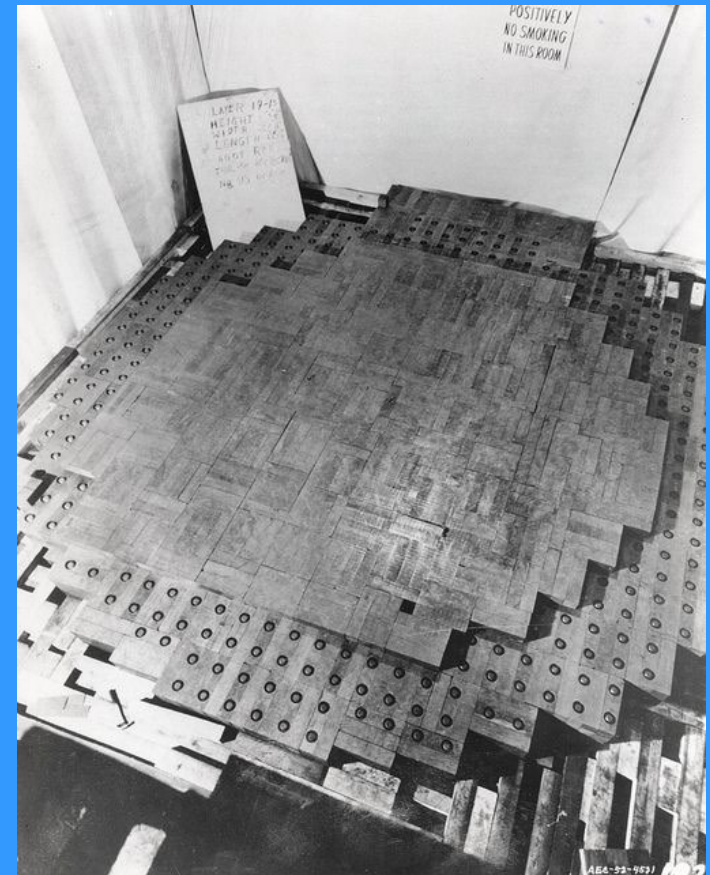
Plan de l'exposé



- Le contexte d'après-guerre et la transition vers la paix (armée)
- Les acteurs militaires et politiques
- La construction laborieuse du projet de sous marin nucléaire
 - Une affaire d'hommes d'exception (Rickover)
 - Les rapports compliqués entre militaires et civils
- Ses apports techniques et scientifiques
- La transposition inespérée (et réussie) vers le nucléaire civil

Contexte historique en 1945

- Projet Manhattan
- Bombes Hiroshima Nagasaki aout 1945
- Expériences de réaction contrôlée à Chicago, Oak Ridge et Hanford
- Idée d'utilisation civile sous-jacente
- Manque de données scientifiques compilées, accessibles (secret), et organisées





La transition du projet Manhattan



- Amiral Bowen premier avocat d'une Navy nucléaire voudrait la faire seul (Naval Research Laboratory NRL fin 1945)
- Echech par refus d'accès aux données par Groves
- Développement d'un réacteur électrogène à Oak Ridge (Daniels)
- Mills envoie Rickover à Oak Ridge pour formation 1946
- Harold Etherington Argonne (Allis Chalmers)
- Ebauche PWR (1947)
- Rickover convainc Nimitz en 1947 intérêt pour sous marins
- Baisse de charge généralisée dans les labos et les chantiers navals à la fin de la guerre



Brien McMahon



- Aout 1946 Loi pour contrôle civil du nucléaire
- Conduira à l'Atomic Energy commission 1^{er} janvier 1947
- Avocat fervent de la propulsion nucléaire sous-marine
- Aide Rickover à sauver sa tête en 1953





Atomic Energy Commission



- Contrôle civil de l'énergie atomique
- Promotion nucléaire civil
- 1^{er} janvier 1947
- Lilienthal 1^{er} président
- General Advisory Committee
- Se prononce contre le développement bombe H en 1949
- Lilienthal quitte en 1950 et Oppenheimer en 1952
- Truman force la décision de lancer la bombe H



Atomic Energy Commission

- Lilienthal remplacé par Strauss en 1950
- La guerre froide mobilise trop de ressources pour un vrai développement du nucléaire civil
- Bikini Avril 1948
- Première bombe A soviétique septembre 1949
- Strauss pousse au développement de l'arsenal de bombes H



Eisenhower et Strauss



William Sterling (Deke) Parsons



- VT Fuse (1942) avec Merle Tuve
- Adjoint d'Oppenheimer à Los Alamos (juin 43)
- Arme « Little Boy » dans Enola Gay
- Operation Crossroads (Bikini 1946)
- Director Nuclear Defence (1947)
- Liaison officer avec BuShips
- Sceptique sur la capacité de la Navy de maîtriser le nucléaire
- Peu favorable à la propulsion nucléaire à court terme





Rear Admiral Earle W. Mills



- Chef du Bureau of Ships de 1946 à 1951
- Il envoie Rickover à Oak Ridge
- Négociateur avec l'AEC du partage des tâches et responsabilités sur le projet de sous-marin nucléaire





Rear Admiral Albert G. Mumma



- Naval Academy 1926
- Etudes en France Ecole Navale
- Bureau of ships (hélices)
- Mission ALSOS (1944)
- Visite Oak Ridge et sélectionne des officiers pour un training nucléaire
- S'oppose à la nomination de Rickover imposée par Mills
- Chef du Bureau of ships (1955)



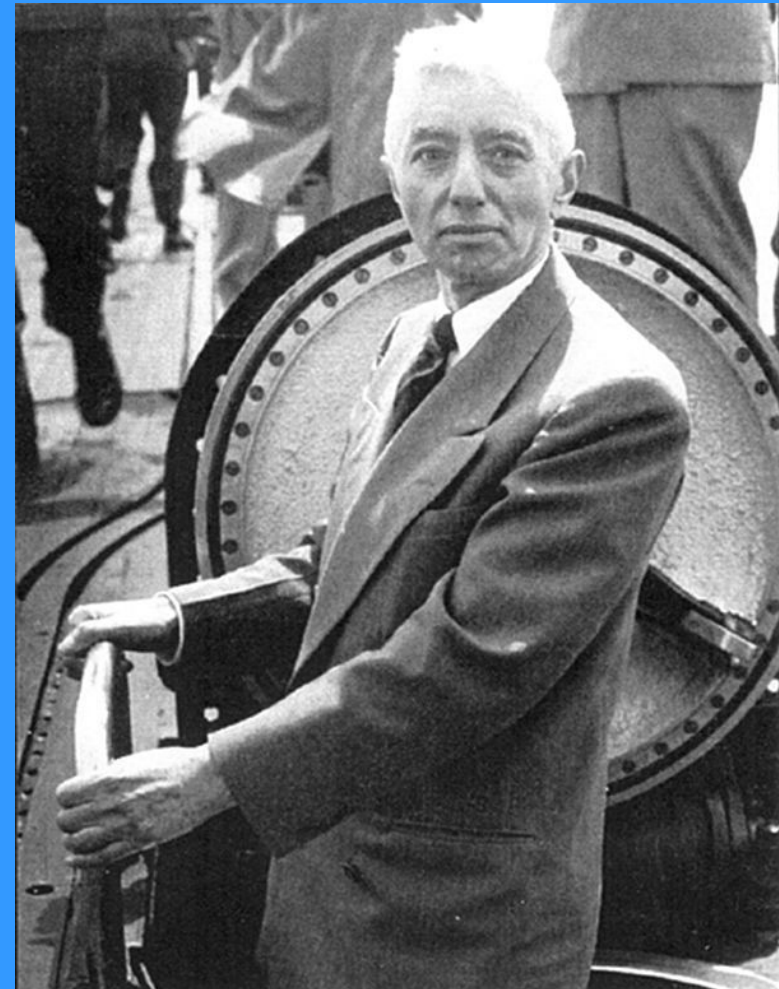


Hyman G. Rickover



- 1900-1986
- Juif polonais émigré avec sa mère en 1906
- Ingénieur électricien Annapolis et Columbia
- Marié 1931
- Sous marinier (1929 à 1933)
- Commandant dragueur de mines 1937
- Bureau of Engineering 1939
- Commandant 1942
- Okinawa shipyard juillet 1945
- Training Oak Ridge Daniels Reactor 1946
- Conviction de l'intérêt de la propulsion nucléaire pour sous marins acquise dès ce moment

16 octobre 2023





Hyman G. Rickover



- Obtient de haute lutte la direction du programme de sous-marins nucléaires (1949)
- Succès dans la construction du Nautilus (1957)
- Succès dans la transposition civile à Shippingport (1957)
- Zéro accident nucléaire dans les sous-marins américains
- Seule personne détentrice de 2 médailles du Congrès dans l'histoire américaine
- 63 ans de service actif dans la marine (record absolu)



Hyman G. Rickover

Personnalité et méthodes de travail



- Travailleur acharné, exigeant, très compétent techniquement et hyper centralisateur (les « pinks »)
- Autoritaire, cassant
- Recrute lui-même un grand nombre de collaborateurs en les mettant sous tension
- Cherche à court-circuiter les hiérarchies
- Combat les blocages bureaucratiques
- Lutte en permanence pour défendre les projets auxquels il croit
- Implication personnelle dans tous sujets techniques
- Adeptes des organisations par projets flexibles et changeantes
- Met toujours en place des structures de formation
- Rigoureux, grand souci de la sécurité
- Pragmatique



Evolutions idées Navy sur les sous-marins



- Etat de la technique en 1945
 - Schnorchel
 - Détection radar et sonar
 - Rapidité en plongée longue: intérêt de la propulsion nucléaire
- Mémoire Rickover à Mills (1947)
- Mars 1949 Rapport Contre Amiral Momsen
- Recommandation d'un premier sous marin pour 1955
- Projets concurrents : Guppy et diesels en cycle fermé



Hyman G. Rickover à Oak Ridge



- 8 personnes de la Navy (Juin 1946-Sept 1947)
- Atmosphère générale de découragement dans les labos
- Projet Daniels
- Rickover dirige ses collègues
 - Assister à tous les cours et conférences sur le site
 - Rapports écrits et résumés de tous les papiers lus et collectés
 - Réunions de debriefing
- Implication des industriels
 - General Electric
 - Westinghouse
 - Babcock et Wilcox
 - Allis Chalmers



Bureau of ships



- Juin 1940 Conception et construction bateaux
- WWII : 6000 pers. 495 chantiers navals 11000 bateaux 17 M\$
- Cochrane et Mills
- Abelson diffusion thermique
- Usine construite à Oak Ridge en 1944 contribue en partie à la fourniture de U 235
- Nimitz et King évaluent les évolutions future des flottes de guerre
- Intérêt pour propulsion nucléaire
- Tolmann committee avec Mills et Solberg nov 1944
- ORI et Naval Research Laboratory 1946



Bureau of ships (BuShips)



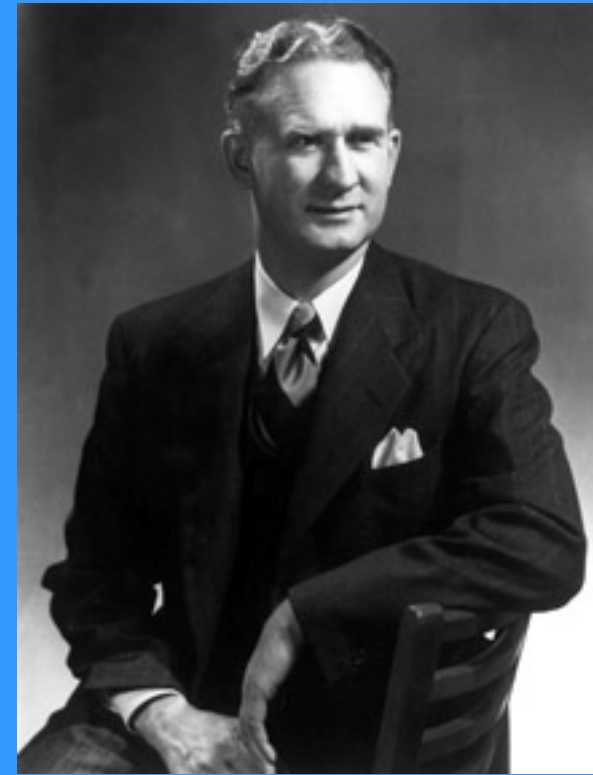
- Janvier 1947 Recommandation pour propulsion nucléaire
- Nucléaire attribué au Ship design département (Morgan , Mumma) mais concurrence avec la Commission
- Cependant contact direct Rickover GE pour Knolls
- GE prend en charge Hanford et en échange le gouvernement finance un labo de R et D à Schenectady (Knolls)



Walter Zinn



- Physicien canadien Columbia
- Pionnier dans les essais sur la fission avec Szilard et le Projet Manhattan
- Directeur du laboratoire d'Argonne (Chicago) (1946-1956)
- Favorable aux réacteurs à neutrons lents et refroidissement eau pressurisée ou hélium
- Centralisation des recherches sur réacteurs à Argonne 1/1/1948
- Nombreuses tensions entre lui et la Navy sur le partage des responsabilités





Revue des labos par Rickover



- Janvier –septembre 1947
- Zinn (Argonne) favorable eau pressurisée
- Lawrence (Berkeley) enthousiaste. Construire un réacteur terrestre pour entraîner l'adhésion et attirer les talents
- Teller encore plus enthousiaste. Devient un supporter de Rickover auprès de Hafstad (Executive Secretary of the Research and Development Board at the Department of Defense)
- Reactor development group avec des ingénieurs oct 47
- Memorandum Nimitz to Sullivan 5 dec 1947



Recherche du leadership



- La commission (AEC) veut tout centraliser à Argonne
- Elle veut que le labo soit pilote et que la Navy participe en tant qu'observateur
- Rien de se passe
- Undersea Warfare Symposium avril 1948
- Exigence de Mills que le projet de la Navy soit approuvé par la commission
- Après de nombreux rebondissements (Solberg) Mills nomme Rickover comme Liaison officer avec la Commission pour le projet 16 juillet 1948



Code 390



- Rickover chef du Code 390 dans la division Recherche (aout 1948)
- A accès à tous les acteurs (Commission, laboratoires, industriels, Navy)
- Reconstitution et élargissement de l'équipe Oak Ridge
- Représentants chez tous les acteurs, reporting détaillé et permanent
- Rickover suscite toutes réunions nécessaires à l'avancement du projet
- Sollicite souvent les dirigeants des différents acteurs en les réunissant
- Fait fi des procédures hiérarchiques: Il est le « client »



Evolution organisation 1949-1950

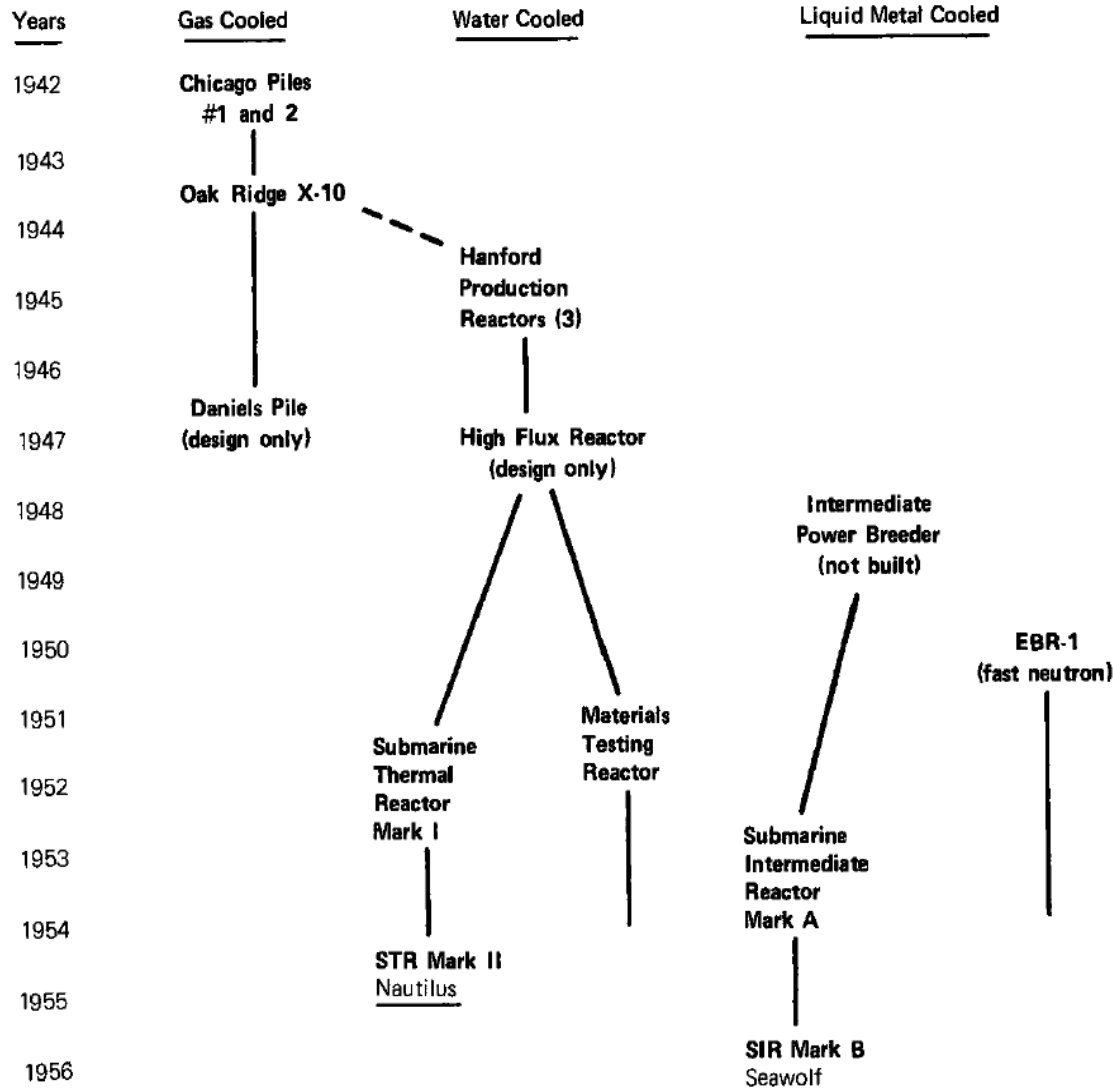


- Débats sur la place des physiciens par rapport aux ingénieurs et des labos par rapport à l'industrie
- Rickover fait la promotion de l'approche parallèle en introduisant Westinghouse (contrat 10 dec 1948 sous la supervision d'Argonne)
- Hafstad nommé directeur R et D à l'AEC
- Organization Code 390
 - Roddis for liquid-metal reactor systems,
 - Dick for pressurized-water systems,
 - Dunford for gas-cooled systems
- Collaborateurs directs
 - Harry Mandil,
 - Bob Panoff
 - Ted Rockwell





EVOLUTION OF SOME EARLY REACTOR CONCEPTS





General Electric



- Contrat Navy pour caloporteur métal liquide - Project Genie (1947-1949)
- Groves demande de prendre Hanford en charge
- En échange labo développement à Shenectady (Knolls)
- Compagnie connue pour son implication R et D
- Reluctance à l'interventionnisme des clients, en particulier de Rickover



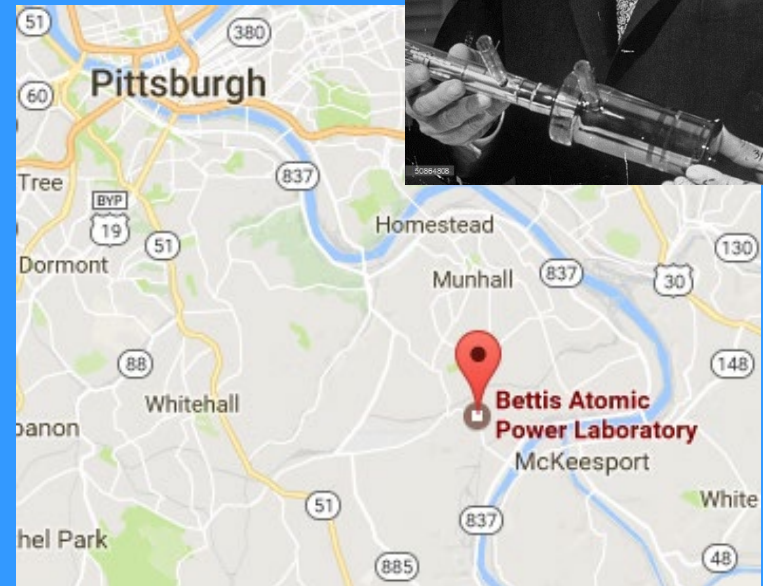
Harry E. Winne



Westinghouse

- Gwilym A. Price CEO
- Rickover le convainc de l'intérêt du nucléaire
- Weaver pour diriger la division
- Création du Bettis Lab près de Pittsburgh (dec 1948)
- Cost plus fee contract pour le projet Navy (contrat définitif le 15 juillet 1949)

Price



Weaver



Ebauches du PWR



- Etherington de Oak Ridge à Argonne
- Le PWR semble être le mieux adapté au sous-marin
- Zirconium débarrassé de l'Hafnium
- Rickover obtient une décision formelle d'Etherington et Zinn pour lancer Westinghouse sur ce concept en mars 1949
- Weaver et Etherington mettent du temps à se coordonner
- Sept 49 Bombe soviétique qui montre l'urgence d'accélérer le projet
- Rickover obtient le leadership pour accélérer la production du Zirconium (mai 1950) Construire une usine à Bettis (12 semaines)



Ebauches du PWR



- Large Pressure Vessel
- Éléments combustibles avec U235 métallique
- Gaines en Zirconium produit à Bettis
- Barres de contrôle en Hafnium
- Simplification du mécanisme de barres par rapport à Argonne
- Générateur de vapeur avec source chaude à l'INTERIEUR des tubes (confinement chaleur et radioactivité)
- R et D matériaux et corrosion indispensable
- Grande attention sur la protection biologique (MIT)



Production de barres de Zirconium

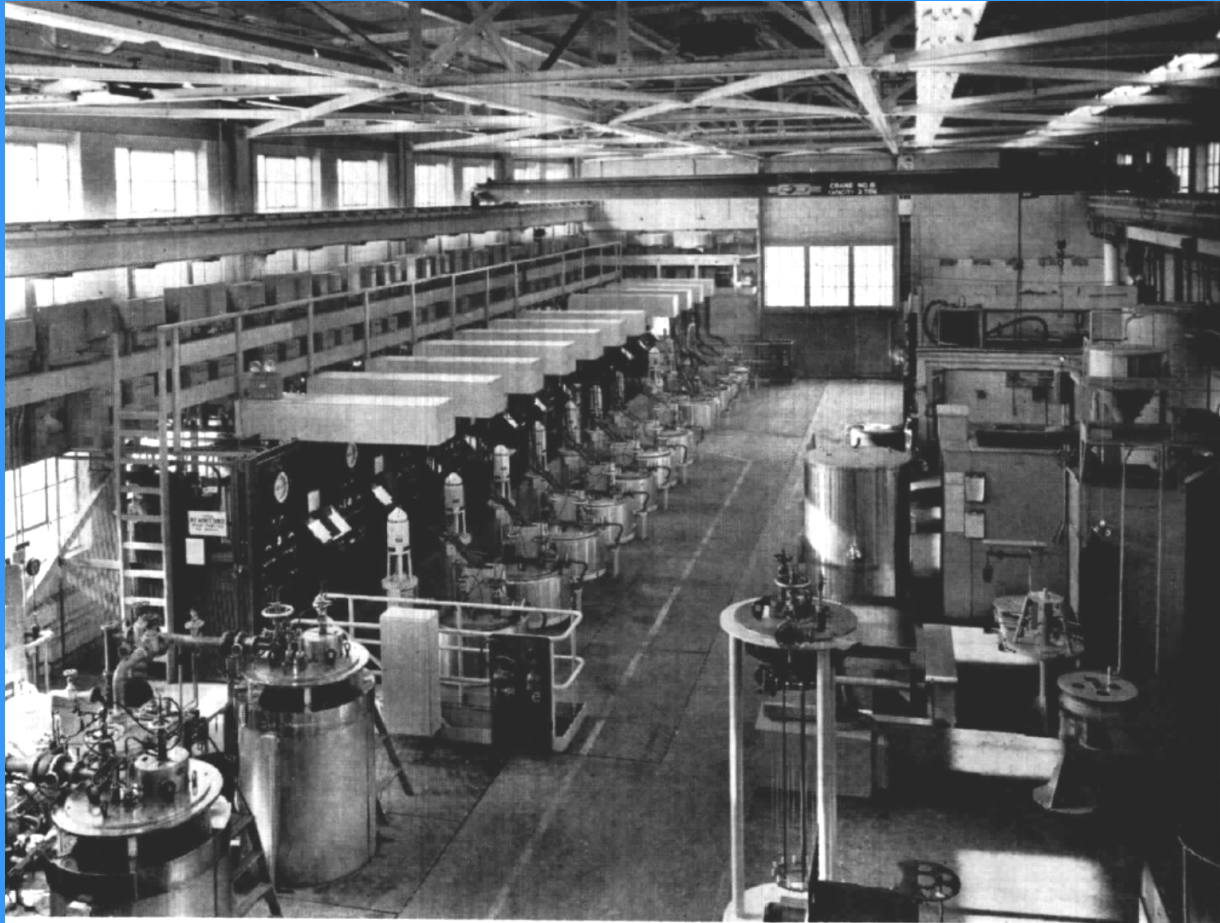
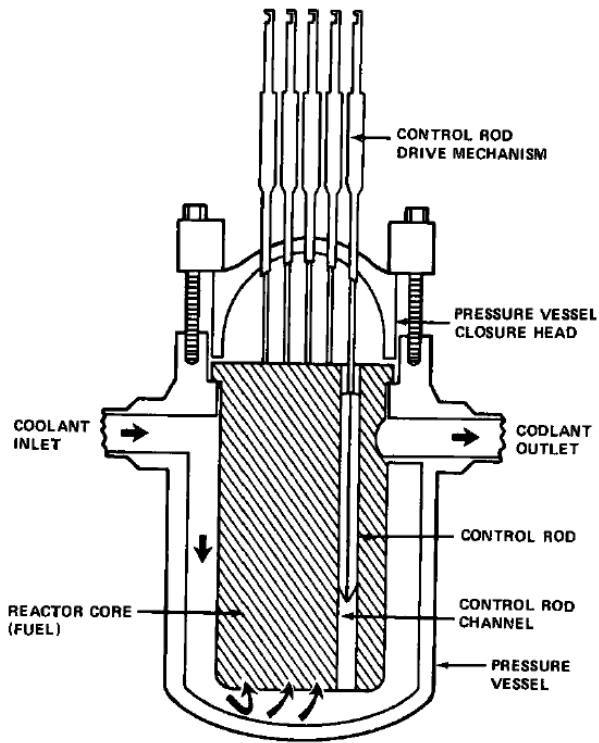
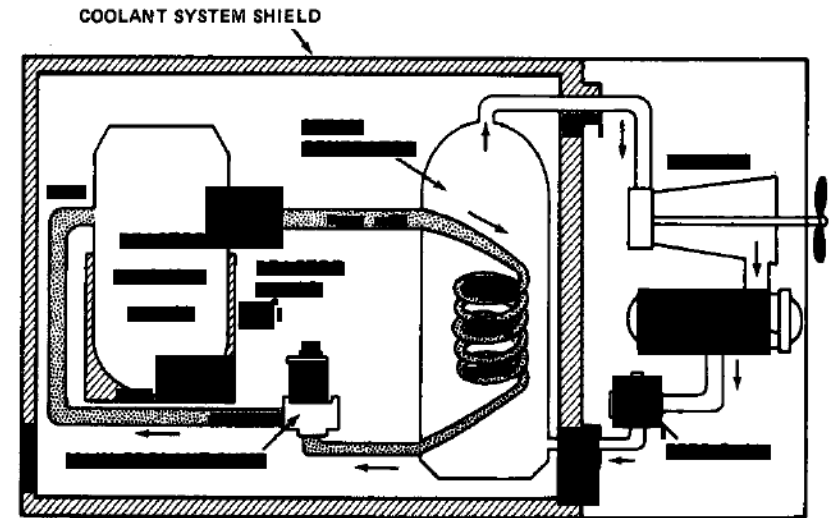


FIG. 18 ZIRCONIUM CRYSTAL BAR PRODUCTION PLANT AT BETTIS SITE

Structure de base du PWR (1950)



A schematic diagram of a pressurized-water reactor.



Schematic diagram of a pressurized-water nuclear propulsion plant. Relative sizes not indicated.



Les difficultés de développement (1950-1952)



- Conception et fabrication des éléments combustibles
- Mécanismes de contrôle de barres
 - Argent-Cadmium ou Hafnium ?
 - Mécanismes individuels ou par groupes ?
- Quaker meetings (390 avec Bettis) Project review groups
- Ne fonctionne pas avec Argonne et Knolls



Construire un sous-marin nucléaire



- Electric Boat Shipyard (privé)
- Portsmouth Naval Shipyard (public)
- 9 février 1950 Rickover témoigne devant le Congrès
- Obtient l'autorisation d'un sous marin nucléaire dans le plan stratégique lancement 1951
- Développement parallèle entre le prototype à terre et le prototype naval (Mark I et Mark II)
- Idée d'une propulsion pour porte avions
- Lancement d'études pour un sous-marin plus rapide que les deux premiers (1951)



Le management du projet Nautilus



- Rickover est véritablement le chef de projet
- Il prend lui-même les décisions techniques
- Implication de compagnies privées sur lesquelles il a une grande influence : embauche (qualité, quantité), rythme de travail, substitution aux sous-traitants défaillants.
- Equipe de collaborateurs triée sur le volet
- Présence physique aussi souvent que nécessaire sur les lieux de production
- Design réalisé sur le lieu de production
- Réalisation simultanée du sous-marin et de sa maquette de validation
- Cette maquette est représentative de la taille et de l'arrangement du sous-marin
- Système de formation continue par compagnonnage et profs d'Universités



Technologies d'un sous-marin



- Double enveloppe
- Diesels et batteries
- Schnorchel
- Propulsion anaérobie
- Sonars
- Arguments en faveur d'une propulsion nucléaire



Electric Boat



- Chantier naval le plus important de la guerre pour les sous-marins (74) à Groton
- Hopkins CEO
- Embauche Shugg comme manager recommandé par Rickover (1951)
- General Dynamics (1952) Pressions de Rickover pour embauche massive d'ingénieurs pour tenir le planning



Construction lancement et essais du Nautilus



- Juin 1952 construction de la coque à Croton et installation des principaux composants de la chaudière (RV, GV, Piping)
- Inauguration avec Truman le 14 juin
- Nautilus inspiré par Jules Verne
- Lancement le 21 janvier 1954 (Mamie Eisenhower)
- 1955-1957 tests en plongée longue durée
- Visites dans ports anglais et français avec visite des officiers de ces pays



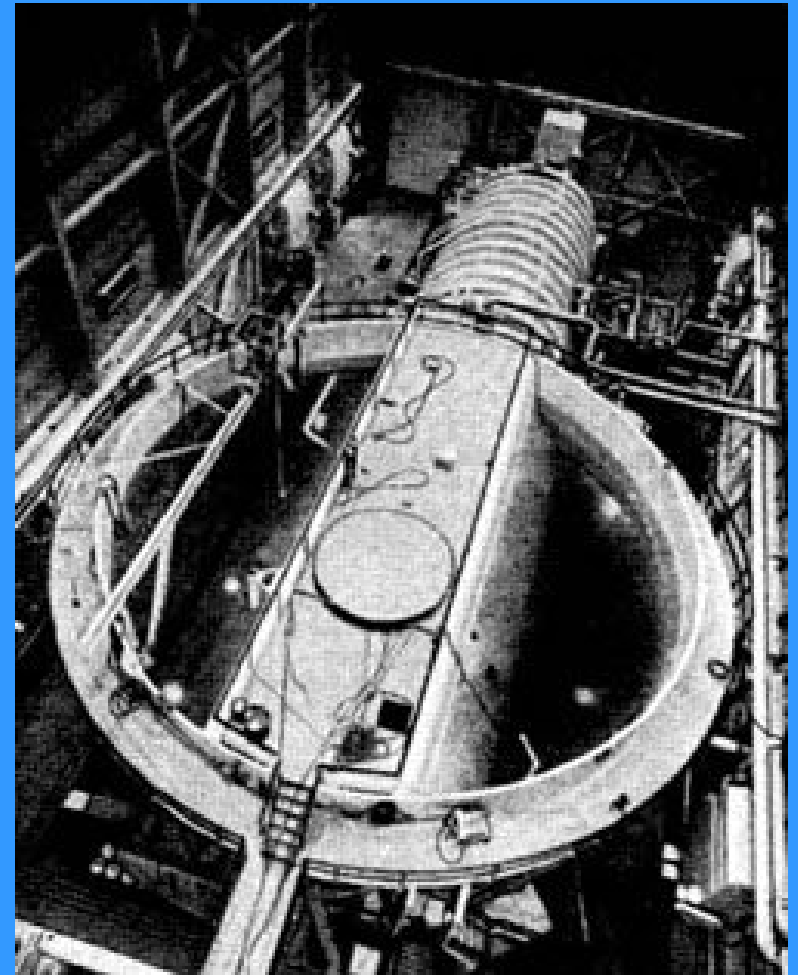
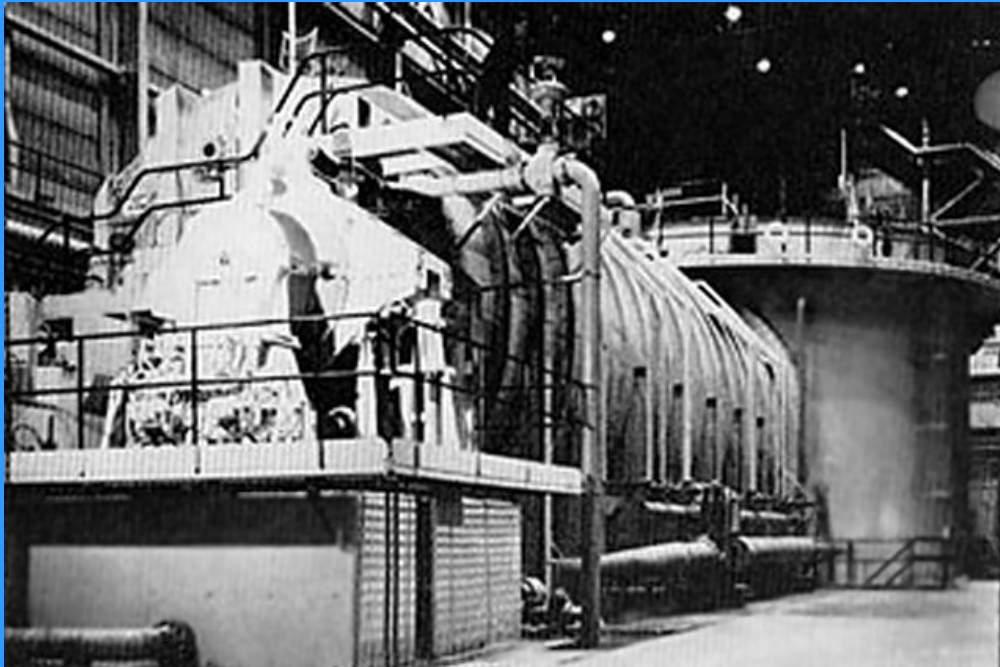
Tests à Idaho



- Zone inhabitée pour essais de réacteurs nucléaires
- Johnston premier directeur (1949) veut tout contrôler
- Conflit avec Rickover qui veut que les concepteurs (Westinghouse) soient les leaders (approuvé par Hafstad)
- Rickover s'implique personnellement dans les choix techniques
- McGaraghan délégué par Rickover comme chef de chantier
- O'Grady pour le suivi des achats
- Début de la rédaction de procédures de fabrication et de contrôle chez les fabricants
- Utilisation de maquettes échelle 1 (Bettis, Electric Boat et Idaho)
- Fin de construction Mark I janvier 1953
- Divergence 30 mars 1953
- Essais en continu pour simuler une traversée de l'Atlantique



Tests à Idaho





Menaces sur Rickover (1952-1953)



- Jalousies au sein du Bureau of ships sur le succès opérationnel du projet
- Menace de mise à la retraite par « oubli » de promotion au grade de contre amiral
- Campagne active au Congrès et dans la presse
- Succès de la divergence du Mark I (31 mai 1953)
- Exception accordée pour passer la promotion de juillet 1953
- Nommé contre amiral à la majorité (et non pas par consensus)

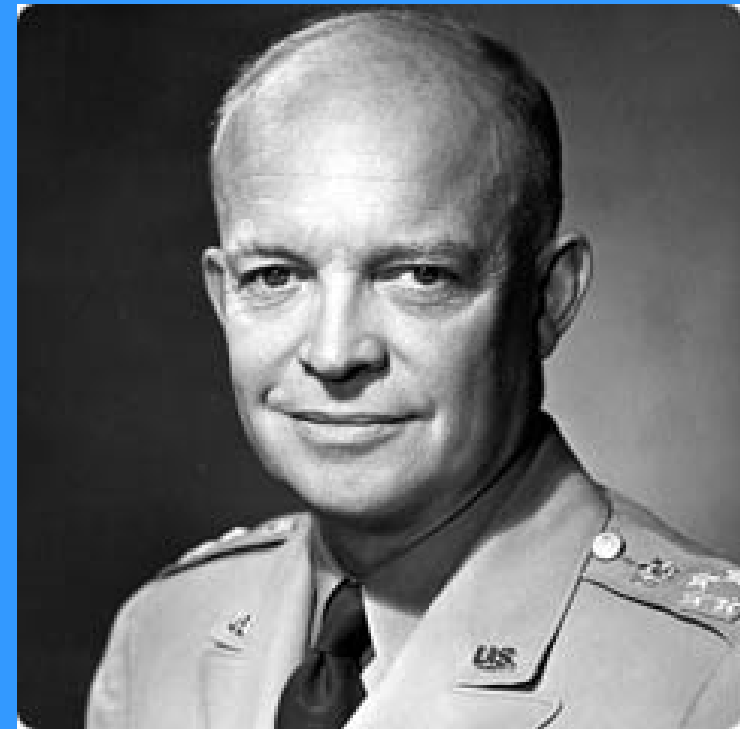




Dwight G. Eisenhower



- Opposé à l'usage de la bombe contre le Japon
- Elu en nov. 1952 (Rep.)
- Discours sur Etat de la Nation 20 janvier 1953: réduction des dépenses militaires
- Atoms for peace 8 dec 1953 UN Assembly
- Lancement Nautilus 21 jan 1954
- Première pierre Shippingport 9 sept 1954
- Inauguration Shippingport 26 mai 1958
- Refus constant d'utiliser effectivement la bombe contre la Chine malgré tous ses conseillers







Atomic Energy Act of 1954



- 30 Aout 1954
- Modification des règles de l'AEC en 1954
- Accès limité possible aux données techniques pour le privé
- Possibilité de brevets par l'industrie
- « Location » des matières fissiles
- Objectif affiché d'aider à la naissance d'une industrie nucléaire privée



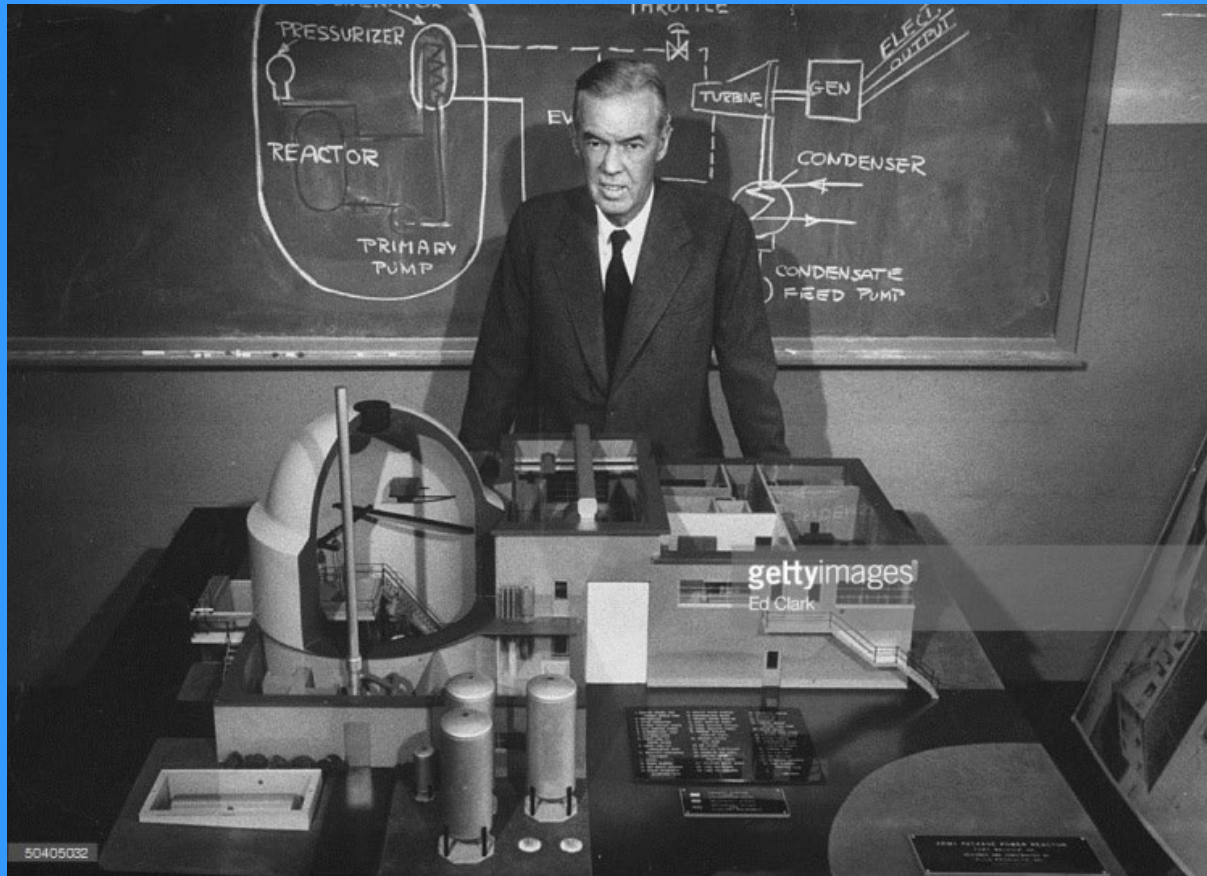
Evolution vers l'électronucléaire civil



- Annulation du réacteur pour porte avions (mars 1953)
- L'AEC annule les développements sodium graphite
- 1954 Budget pour continuer les études vers un réacteur civil
- Concurrence des budgets pour armement nucléaire
- Lobbying industrie pour éliminer la Navy (Rickover) du projet (Cole – Joint committee on Atomic Energy)
- Finalement Budget étude et construction pour projet terminé en 1957 (9 oct 1953)
- Westinghouse réacteur et circuit primaire
- Annonce publique par Murray le 22 oct 1953
- Consultation pour appel à Investisseur pour la centrale (deadline 15 fev 1954)



Thomas E. Murray Commissioner at AEC (1953)





Apport des groupes techniques du Code 390



Résultat du programme de formation mis en place par Rickover

- *The Metallurgy of Zirconium* (1955),
- *A Bibliography of Reactor Computer Codes* (1955),
- *The Metal Beryllium* (1955),
- *Corrosion and Wear Handbook* (1957),
- *The Metallurgy of Hafnium* (n.d.), and the three-volume *Physics Handbook* (1959-64).



US Atomic Energy Act (1954) PRDP (1955-1963) *Power Reactors Demonstration Program*



- Fuel « loué » pour 7 ans
- R&D dans labos publics mise à disposition
- Financement des centrales et risques associés supporté par les Utilities
 - Phase 1 : Yankee Rowe (démarré en 1960) et Fermi (breeder)
 - Phase 2 : Pika (organic) et Elk River (BWR)
 - Phase 3 : Pathfinder (BWR), CVTR (HWR), Peach Bottom (HTR hélium)
 - Tenter de démontrer la faisabilité technico économique de nouveaux concepts
- Autres projets parallèles
 - San Onofre, Yankee Haddam Neck (PWR)
 - BONUS, LaCrosse, Big Rock Point (BWR)



Duquesne Light



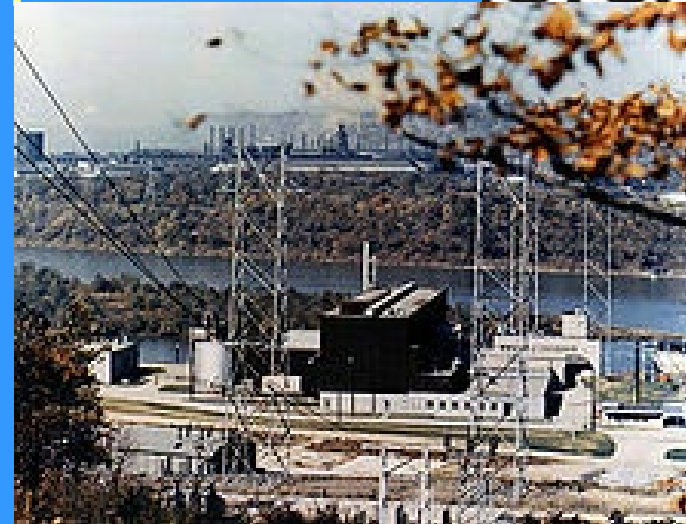
- Fondée en 1906
- Holding Philadelphia Company (1912)
- Expansion jusqu'aux années 20
- Résiste relativement à la crise des années 30
- Déclin puis renaissance après la guerre
- Expansion vigoureuse avec explosion de la demande début années 50
- Tradition de coopération (inféodation?) avec les constructeurs (GE et Westinghouse)



Duquesne Light et Shippingport



- Philip A. Fleger CEO (Lawyer 1939) pro nucléaire
- Promu par AEC (Murray) 90%
- Duquesne investit 10% (au final 20 sur 75 M\$)
- Participe au développement (5M\$)
- Stone and Webster (avril 54)
- Dravo Corporation (piping)
- Burns & Roe (îlot nucléaire)
- Cuve: Combustion Engineering
- GV : Babcock & Wilcox
- « Shift rep » délégué permanent de Rickover dans la salle de commande





Le management du projet Shippingport

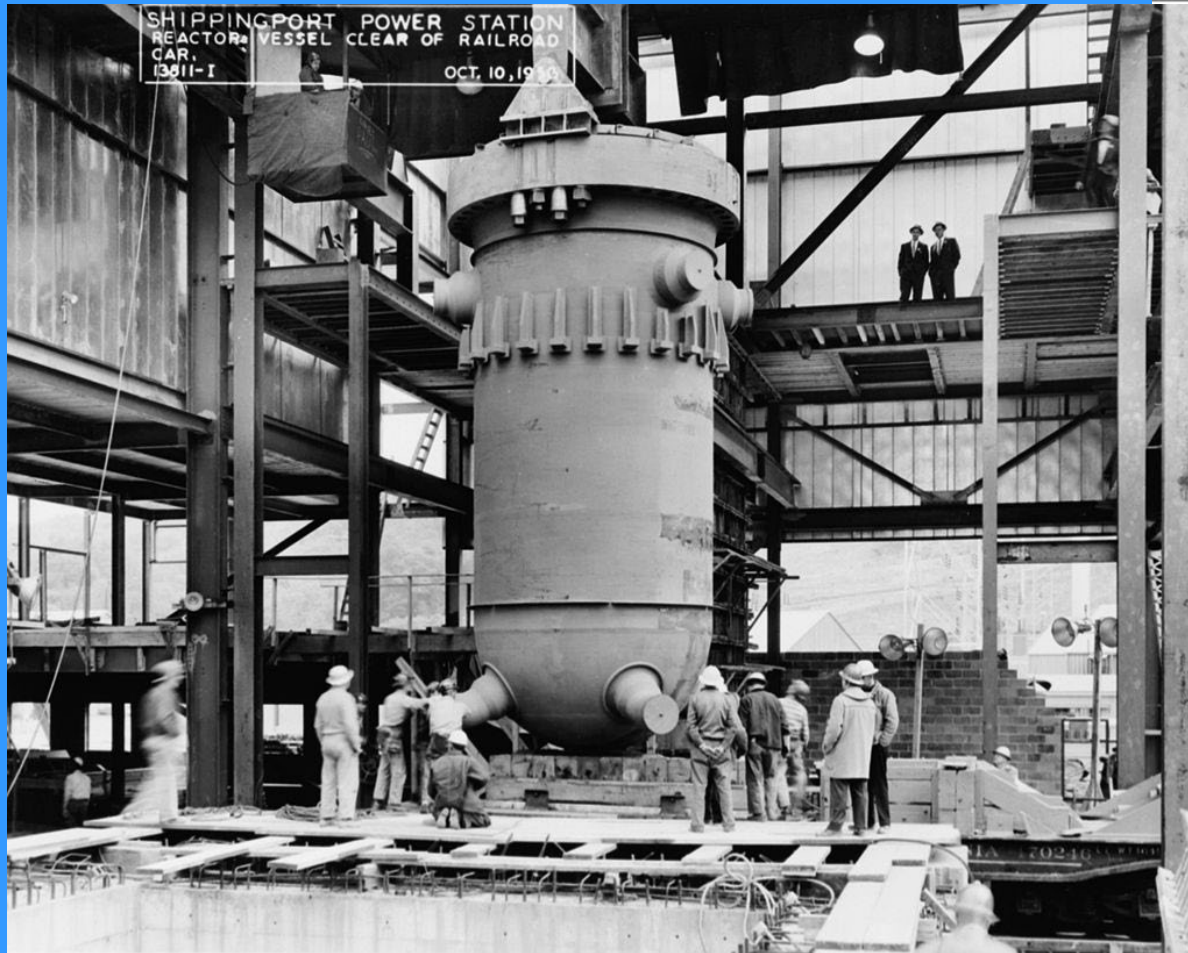


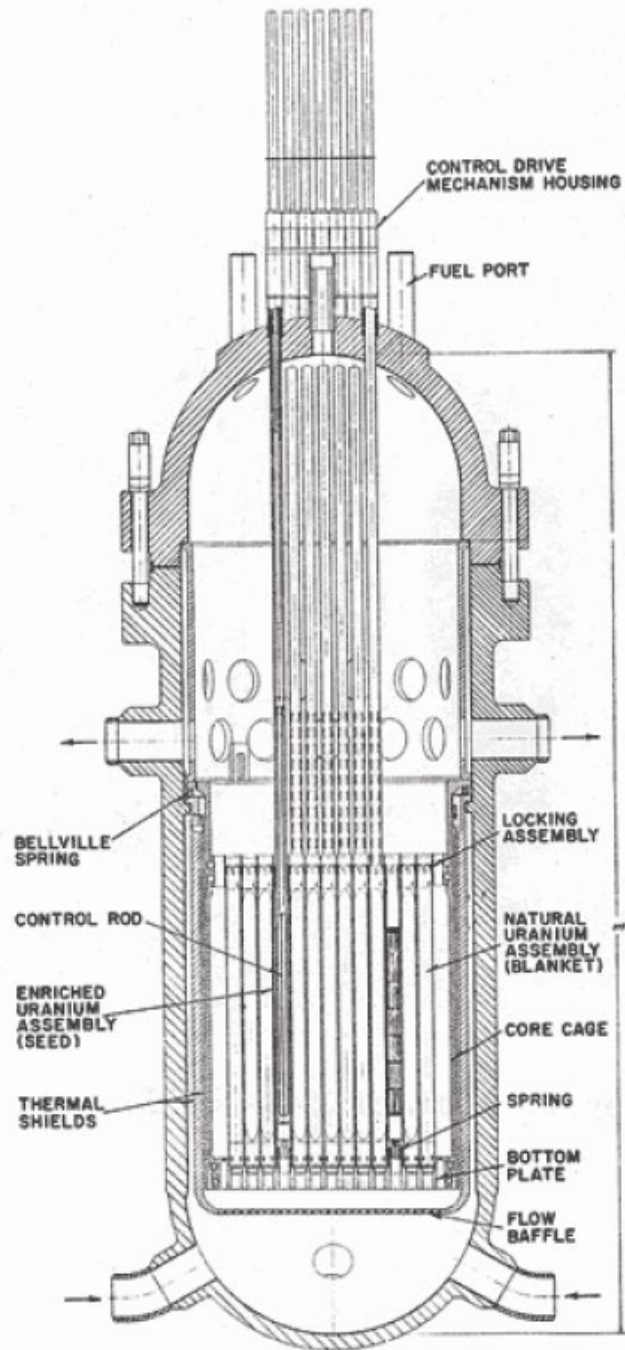
- Reprise du schéma Nautilus
- Implication de Duquesne Light (training)
- Fourniture terrain, turbine et R&D à hauteur de 5 M\$
- Opportunité pour choix techniques sans attendre le retour du Nautilus
- Objectif double
 - Prouver la faisabilité d'une centrale électronucléaire civile
 - Tester différentes variantes de construction
- Formation intense du personnel à Idaho et sur le site
- « Shift rep » représentant de Rickover pouvant stopper la centrale sans l'accord de Duquesne

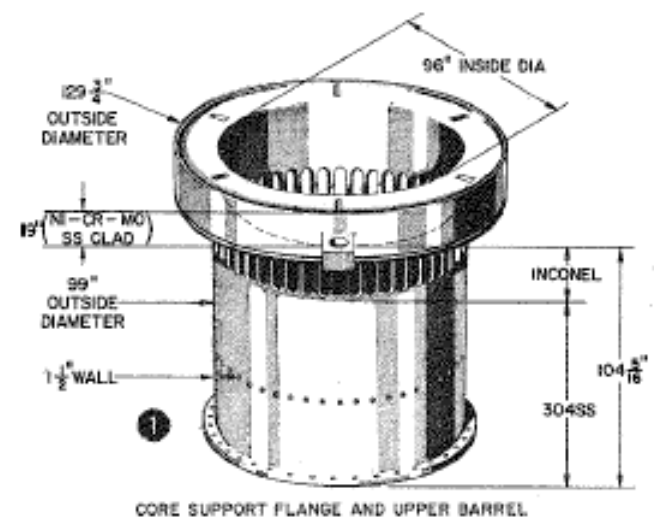
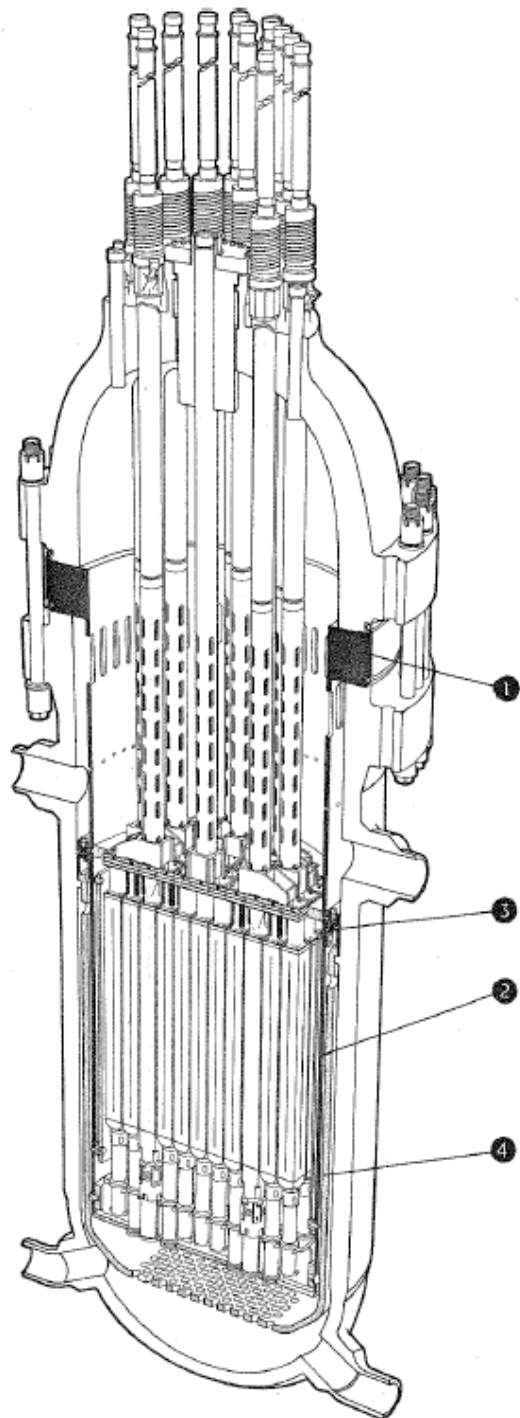


Nuclear technology and diplomacy at a tour of Shippingport construction (from left): Charles H. Weaver, vice president of Westinghouse; Edwin Plowden, chairman, United Kingdom Atomic Energy Authority; Lewis L. Strauss, chairman of the AEC; Philip A. Fleger, chairman, Duquesne Light Company; Admiral H. G. Rickover; and H. Briggs Jr., Duquesne's manager of advertising and public relations.

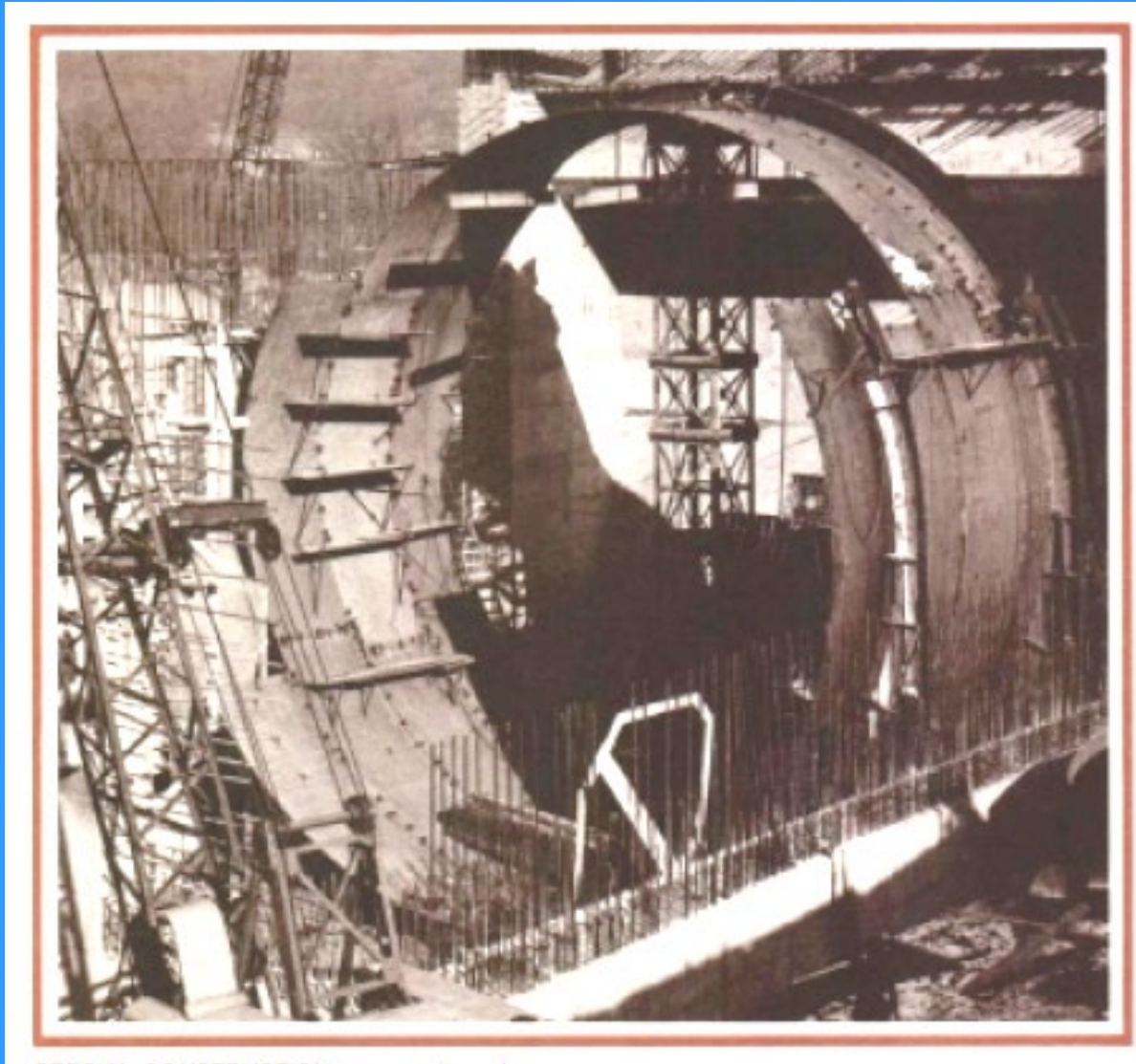
La cuve de Shippingport (1956)



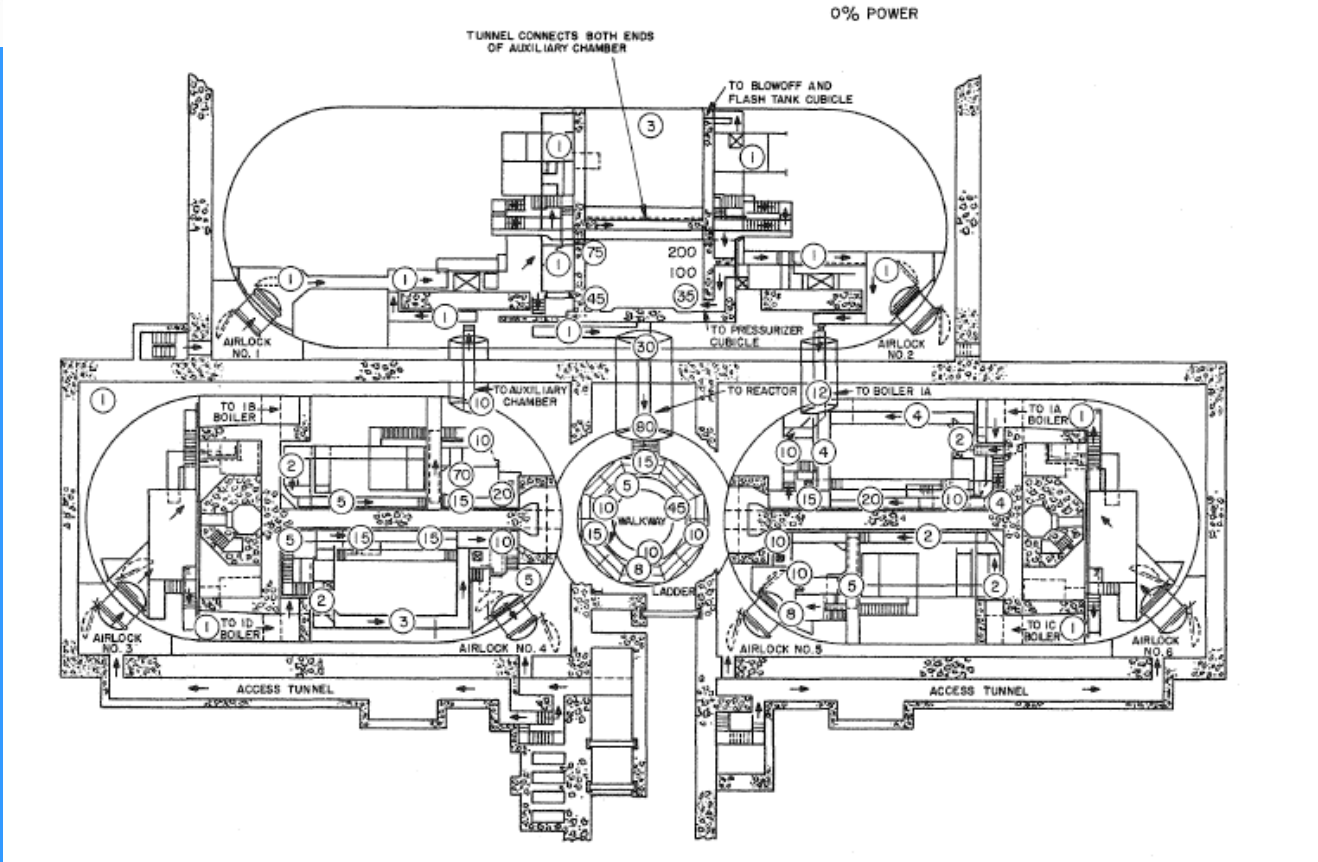




Enceintes de confinement



Enceintes de confinement

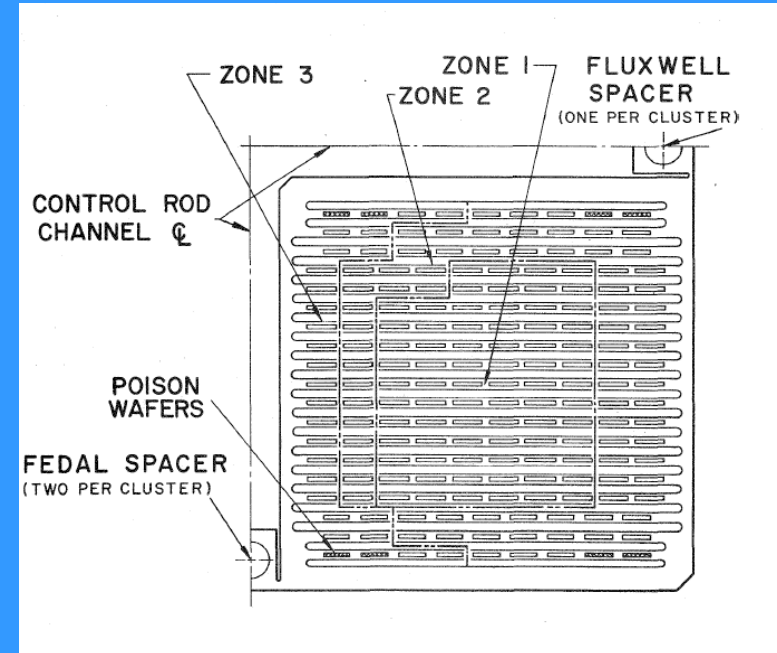
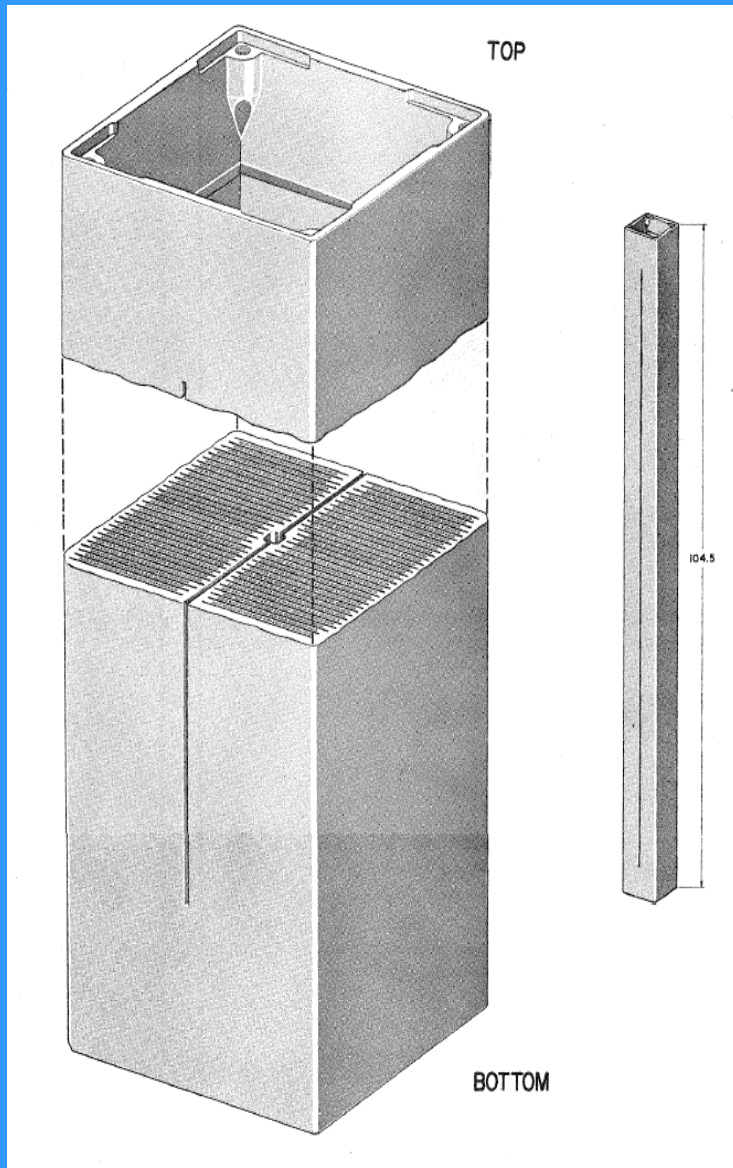




Conception des éléments combustibles

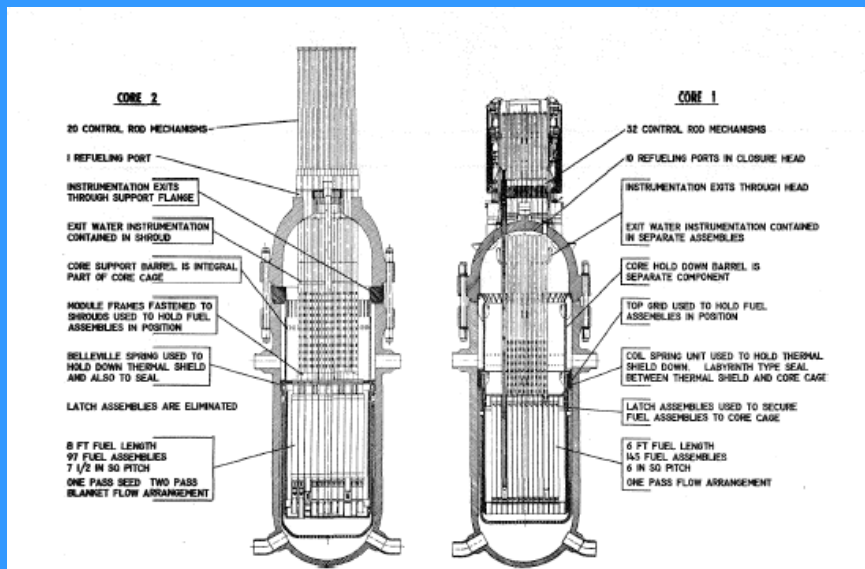


- Pour le cœur d'un porte avion il était envisagé un uranium faiblement enrichi pour éviter un inventaire de U militaire
- Choix d'un cœur avec initiateur hautement enrichi et couverture pour faciliter le chargement déchargement
- Permet de vérifier la fonction breeder
- Recherche de technologie pour fuel de couverture (longue exposition neutronique sans corrosion ni fissure)
 - Alliage métallique U Be Si
 - UO_2
- 26 avril 1955: la couverture (blanket) sera en UO_2 cylindrique dans tubes en zircalloy



- Cœurs (seed and blanket)

1. Initiateur U235 (0,5% masse totale) hautement enrichi (93%) et couverture U 238 – 7 ans – 4 recharges initiateur
2. Plus d’initiateur – 9 ans -1 recharge
3. Cœur breeder en U 233 et Thorium pour la couverture – 5 ans





La mise en service



- Calder Hall (UK) démarre en mai 1956 (1^{er} réacteur civil au monde)

Shippingport

- 6 oct 1957 installation du cœur
- Criticalité 2 dec 1957
- Connexion réseau 18 décembre
- Puissance nominale 60 MW 23 dec. 1957
- Essais sur le premier cœur jusqu'en octobre 1959
- Coût d'exploitation 10 fois celui des centrales conventionnelles (FOAK)



Données de Shippingport



Shippingport Highlights

I. Project History

Date project was authorized July 1953
 Date ground was broken September 1954
 Date construction started March 1955

II. Operation with Core 1

| | <u>Seed 1</u> | <u>Seed 2</u> | <u>Seed 3</u> |
|--|-------------------|-----------------|------------------|
| Date of initial criticality | December 2, 1957 | April 12, 1960 | October 7, 1961 |
| Date plant reached full power (60,000 KW net) | December 23, 1957 | May 7, 1960 | October 24, 1961 |
| Lifetime, EFPH | 5806 | 7900 | 6500 (Est.) |
| Total electricity generated, KWH gross | 388,500,000 | 514,300,000 | - |
| Average load factor | 37% | 70% | - |
| Average load factor excluding testing | 75% | 97% | - |
| Date refueling started | November 2, 1959 | August 16, 1961 | - |
| Date refueling was completed | April 11, 1960 | October 6, 1961 | - |

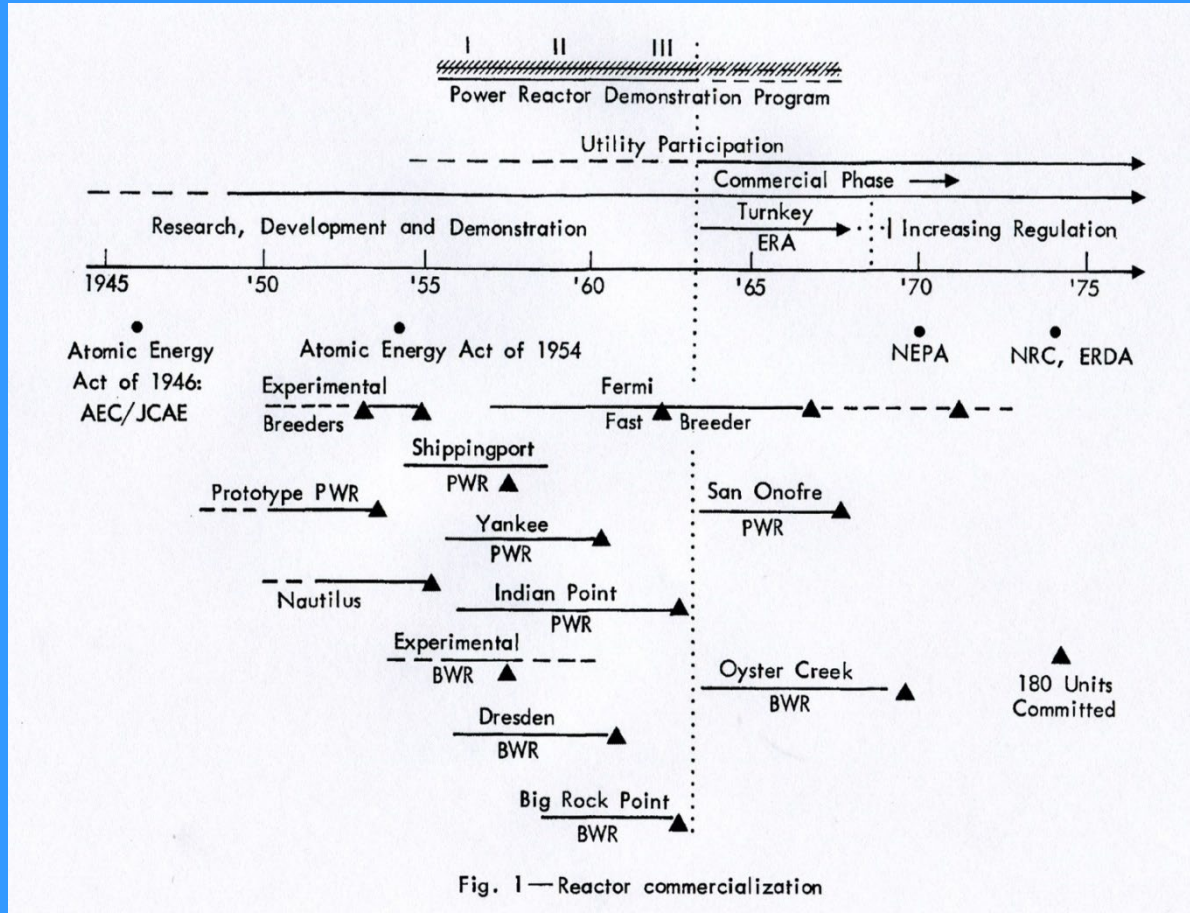
III. Core Loading Data

| | | | |
|---------------------------------|--------------|------------------|------------------|
| Core 1: Seed - Uranium | 75 kg U-235 | 90 kg U-235 | 90 kg U-235 |
| Boron | 0 | 170 gm natural B | 170 gm natural B |
| (Blanket - 14.2 tons natural U) | | | |
| Core 2: Seed - Uranium | 336 kg U-235 | - | - |
| Boron | 456 gm B-10 | - | - |
| (Blanket - 18.7 tons natural U) | | | |

IV. Total Electricity Generated and Fuel Burnup Data

Total electricity generated on Core 1
 (Seed 1 and Seed 2 gross output) 902,800,000 KWH
 Approximate amount of electricity delivered to DLC system
 (Seed 1 and Seed 2 net output) 820,000,000 KWH
 Total operating time on Core 1 13,706 EFPH
 Peak burnup in Core 1 blanket fuel (natural UO₂) 20,000 MWD/T of UO₂
 (after Seed 2 operation)
 Average burnup in Core 1 blanket fuel 4500 MWD/T of UO₂
 (after Seed 2 operation)

Premiers réacteurs commerciaux aux USA





Transitions vers le nucléaire commercial aux USA



- Westinghouse
- General Electric
- Combustion Engineering
- Babcock & Wilcox
- Association avec un ou plusieurs clients pour le design de base
- Celui-ci sert de support aux premières réalisations et aux accords de coentreprise avec sociétés étrangères (Framatome, KWU, Hitachi, Babcock, Kepco....) mises en place très rapidement



Coopération internationale



- IAEA (1957)
- EURATOM (1958)
- FRAMATOME (1958)
- Cadre favorable à l'octroi de licences aux sociétés européennes



Evolution design Westinghouse (PWR)



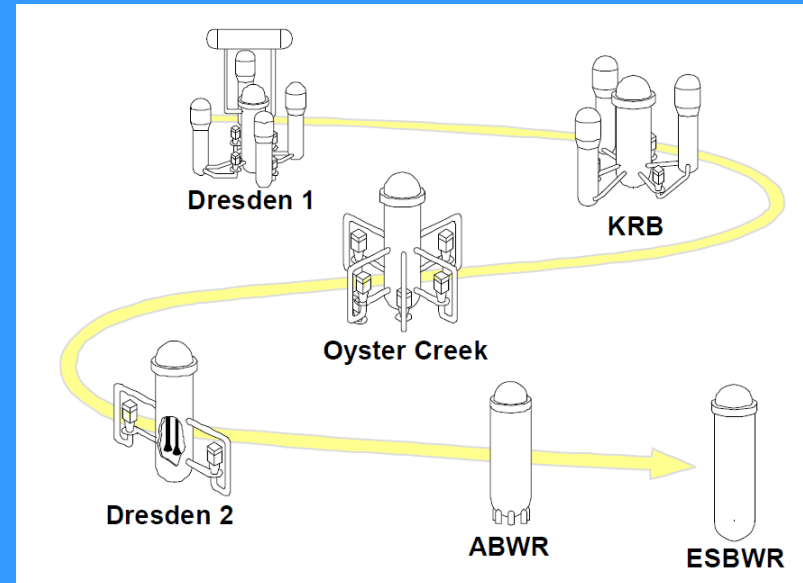
- Mark I Nautilus
 - U hautement enrichi fuel plates
- Shippingport
 - Seed and Blanket design
- Yankee Rowe
- Indian Point



Evolution design General Electric Electric (BWR)



- Très rapide et profonds changements d'une centrale à l'autre
- Variété des clients
- Compétition avec Westinghouse
- Les GV des premières centrales ont disparu





Conclusions

Les raisons d'un succès industriel



- Permanence d'un leader incontestable Amiral Rickover
- 1946-1982
- Deux médailles du Congrès (unique dans l'histoire américaine)
- Implication de l'industrie privée dès les premières phases de développement
- Implication technique très forte
- Choix techniques judicieux (avec le recul)
- Bataille permanente contre les rigidités bureaucratiques
- Essaimage mondial grâce aux entreprises américaines



Academic reactor



- "An academic reactor or reactor plant almost always has the following basic characteristics:
 - (1) It is simple.
 - (2) It is small.
 - (3) It is cheap.
 - (4) It is light.
 - (5) It can be built very quickly.
 - (6) It is very flexible in purpose ("omnibus reactor").
 - (7) Very little development is required. It will use mostly "off-the-shelf" components.
 - (8) The reactor is in the study phase. It is not being built now.



Practical reactor



- "On the other hand, a practical reactor plant can be distinguished by the following characteristics:
- (1) It is being built now.
- (2) It is behind schedule.
- (3) It is requiring an immense amount of development on apparently trivial items. Corrosion, in particular, is a problem.
- (4) It is very expensive.
- (5) It takes a long time to build because of the engineering development problems.
- (6) It is large.
- (7) It is heavy.
- (8) It is complicated.



Academic vs. Practical



- "The tools of the academic-reactor designer are a piece of paper and pencil with an eraser. If a mistake is made, it can always be erased and changed. If the practical-reactor designer errs, he wears the mistake around his neck; it cannot be erased. Everyone can see it.
- "The academic-reactor designer is a dilettante. He has not had to assume any real responsibility in connection with his projects. He is free to luxuriate in elegant ideas, the practical shortcomings of which can be relegated to the category of "mere technical details." The practical-reactor designer must live with these same technical details. Although recalcitrant and awkward, they must be solved and cannot be put off until tomorrow. Their solutions require manpower, time and money."