

特別講義

2010年12月24日
茨城大学 工学部

相対性理論と原子力
核不拡散への取り組み
原子力の平和利用
持続可能性と核燃料サイクル
高速炉燃料工学

Dr. N. Nakae
東京工業大学

原子力の平和利用

シカゴパイル実験
最初の原子力発電
日本における原子力研究と発電炉
TMI、チェルノブイリ事故
原子力安全活動

シカゴパイル実験の概要

- 1939年にドイツのオットー・ハーンとフリッツ・シュトラッスマンによって核分裂反応が発見されると、その後は連鎖反応とその制御に研究の重点が移った。
- コロンビア大学の亡命イタリア人エンリコ・フェルミの研究はぬきんでおり、1941年には基礎的な理論は完成していた。
- この研究は1942年に発足したマンハッタン計画に組み込まれ、研究の場をシカゴ大学に移し本格的な研究がスタートした。
- 1942年5月に原子炉の設計が開始され、同年11月にはシカゴ大学のフットボール競技場スタッグ・フィーの観客席下にあったスカッシュコートに極秘裏に建設が開始された。
- 1942年12月2日午前8:30より実験が始まり、同日午後3時25分(シカゴ時間)、科学者の一人ジョージ・ウェイルの操作により制御棒が引き抜かれ、原子炉は臨界に達した。



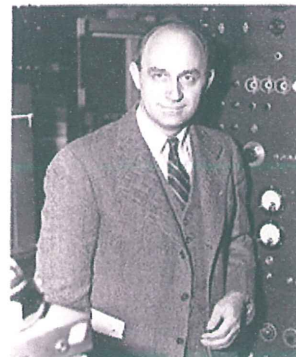
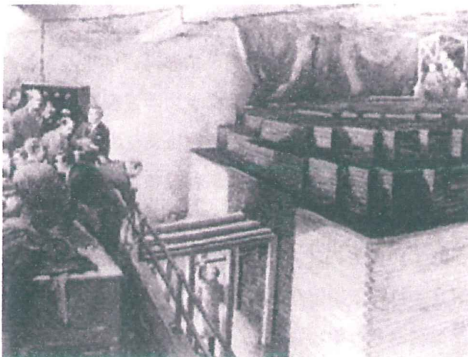
シカゴ大学 スタッグ・フィールド(Stagg Field)
(1927年)

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%AB%E3%82%B4%E3%83%BB%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%AB1%E5%8F%B7>

http://en.wikipedia.org/wiki/Stagg_Field

シカゴパイル実験の目的

- シカゴ・パイル1号 (Chicago Pile 1, CP-1)とは、歴史上初めて臨界に達した最初の原子炉の名称である。
- CP-1は原子爆弾材料のプルトニウム239生成用原子炉を設計するための実験炉として開発された。



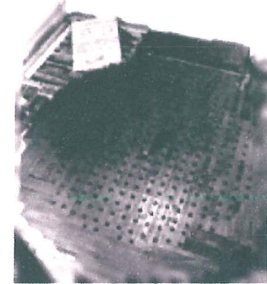
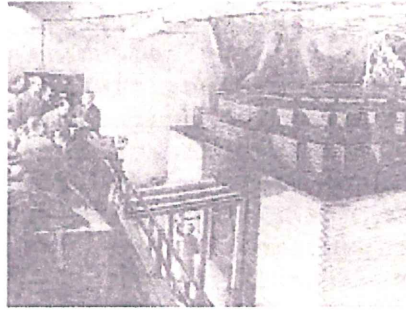
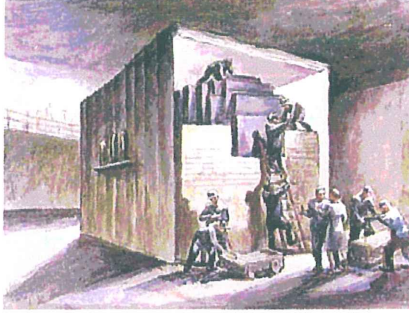
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%AB%E3%82%B4%E3%83%BB%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%AB1%E5%8F%B7>

<http://www.iae.or.jp/energyinfo/energydata/data3002.html>

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%82%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%83%9F>

シカゴパイル実験の参加メンバー

世界で初めての原子炉は、ハンガリー生まれの米国人レオ・ジラードのアイデアをもとに、イタリア生まれの米国人エンリコ・フェルミ(1938年ノーベル物理学賞受賞)をリーダーとするプロジェクトチームが実現した。実験参加者は総勢51人であった。



CP-1で黒鉛ブロックを積み上げている様子や実験の様子

CP-1の炉心上部の写真



[出典]経済産業省原子力のページ
[出典]Paks Nuclear Power Plant ホームページ
<http://web.kyotoinet.or.jp/people/tbc00346/component/sentiment4.html>
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/sonota/study/aecall/book/pdf/1syou.pdf>

シカゴパイルの構造及び実験の成果

■ シカゴパイルの構造

- ◆ CP-1は黒鉛ブロックを積み上げた(pile)小型原子炉で、形式としては黒鉛減速空気冷却炉である。
- ◆ 初期の原子炉は全て黒鉛炉だったこともあって、パイルと言う言葉は原子炉と同義となっていた。
- ◆ 炉心を構成する黒鉛ブロックは木枠で支えられ手積みで組み上げられた。
- ◆ 使用された黒鉛ブロックは350トン、全体の大きさは直径7.5m高さ6mで、小さな二階建ての家ほどだった。
- ◆ 核燃料として35トンのウランを用い、3本のガドミウム製制御棒を持っていた。うち1本は緊急停止用で、上からロープで吊るされており、異常があればロープを斧で断ち切って炉心へ落とす仕組みだった。また、ガドミウム塩溶液が準備されており、制御棒の故障時には炉心内へ流し込むことになっていた。
- ◆ 研究炉であるため発電系統は備えていない。と言うより、原子力発電のアイデアが検討されるのは戦後になってからである。

■ シカゴパイルの実験の成果

- ◆ CP-1を大型化したプルトニウム生産炉とプルトニウム抽出工場が、ワシントン州リッチランド北部のコロンビアハンフォード工学工場(Hanford Engineering Works)川沿いの土地として建設された。
- ◆ 最初のプルトニウム生産炉であるハンフォードB炉は1943年9月から建設が始まり、翌1944年9月に運転開始、同年12月28日に臨界に達した。
- ◆ 続くハンフォードD炉も1944年2月17日に臨界に達した。
- ◆ 三基目のF炉は1945年2月に運転を開始した。



<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%AB%E3%82%B4%E3%83%BB%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%AB1%E5%8F%B7>

http://www.chugoku-np.co.jp/abom/nuclear_age/us/020224.html

シカゴパイル実験の効果

- B炉で生成されたプルトニウムのうち、一部は1945年7月16日にニューメキシコ州アラモゴードで実施された原爆実験に使用され、残りは1945年8月9日に長崎市に投下された原爆(ファットマン)に使用された。
- プルトニウム生産炉は黒鉛減速軽水冷却原子炉で天然ウランを使用し、プルトニウム生産専用で発電系は備えていない。コロンビア川は原子炉からの温排水で常時湯気を立てるようになったといわれている。
- 原子炉で燃焼した天然ウラン燃料からはプルトニウム抽出工場でウラン238から転換したプルトニウムが抽出、精製された。
- 戦争終了後もハンフォードでは原子炉の建設が進められ、最終的に9基のプルトニウム生産炉が建設された。これら生産炉はおおむね20年程度使用されて順次閉鎖された。
- 1997年9月23日に米国とロシアの間でプルトニウム生産炉協(PPRA: Plutonium Production Reactor Agreement)が結ばれたことにより、ハンフォードで最後まで稼動していたN炉が1998年9月に閉鎖され、ハンフォードの半世紀に及ぶプルトニウム生産が終了した。
- CP-1他は最初期の原子力施設であり放射能に対する配慮が欠けていた。故に、原子炉に近接するコロンビア川では放射能汚染が深刻な問題となっている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%AB%E3%82%B4%E3%83%BB%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%AB1%E5%8F%B7>

ケネディー大統領と原子力

原子力発電の推進

- ◆ ケネディーの大統領就任期間である1960年初頭は米国で原子力発電所の建設・運転ラッシュの時代であった。
- ◆ ケネディーの大統領にとって原子力発電の推進は、彼の「ニュー・フロンティア計画」の柱のひとつだった。
- ◆ 総発電能力を3倍にする必要があり、それを達成するには原子力発電の拡大しかなかった。そのため、ケネディーはノーベル賞 受賞者のグレン・T・シーボルクを原子力委員会の委員長に起用し、原子力発電時代の幕開けのかじとりを任せた。

核戦争の回避（キューバ危機回避）

- ◆ 1962年10月22日にケネディーはテレビ演説で国民にキューバにミサイルが持ち込まれた事実を発表し、ソ連を非難した。その後アメリカ軍部隊へ準戦時体制を発令、ソ連との全面戦争に備えアメリカ国内の核弾道ミサイルを発射準備態勢に置き、ソ連も国内やキューバの核弾道ミサイルが発射準備に入った。
- ◆ 10月27日にU-2偵察機がソ連軍の対空ミサイルで撃墜されるなど緊迫状況が続く中、ワシントン時間10月28日午前9時、フルシチョフはモスクワ放送でミサイル撤去の決定を発表した。フルシチョフはキューバに建設中のミサイル基地やミサイルを解体、ケネディーもキューバへの武力侵攻はしないことを約束、その後1963年4月トルコにあるNATO軍のジュピター・ミサイルの撤去を完了した。米ソによる全面核戦争勃発は回避された。



1917年 誕生
1961年 第35代大統領に就任
1962年 キューバ危機
1963年 ダラスで暗殺



U2 偵察機

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%BB%E3%82%B1%E3%83%8D%E3%83%87%E3%82%A3>
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%90%E5%8D%B1%E6%A9%9F>

最初の原子力発電所

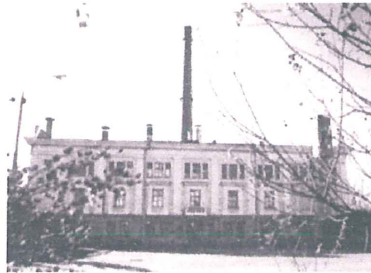
世界最初の原子力発電

米国EBR-1 (150kWe) (1951年12月20日)

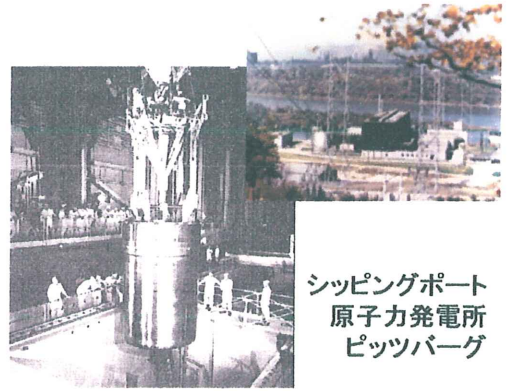
世界最初の商業用原子力発電所

ソ連オブニンスク黒鉛減速軽水冷却炉 (5,000kWe) (1954年6月27日)

米国 SHIPPING PORT 原子力発電所 (60,000kWe) (1957年12月2日)



オブニンスク原子力発電所
モスクワ近郊



吉川秀夫、連載講座 軽水炉プラント-その半世紀の進化のあゆみ、日本原子力学会誌、Vol. 49, No. 10 (2007)

石川 寛、連載講座 軽水炉プラント-その半世紀の進化のあゆみ、日本原子力学会誌、Vol. 49, No. 11・12 (2007)

沸騰水型炉の可能性追求

沸騰水型炉の魅力

- 水の蒸発の潜熱を利用し、効率的な熱除去を達成できること
- 原子炉内で直接蒸気を得られるので、熱交換器なしに蒸気を直接タービンに送ることができ経済的であること
- 自然循環を利用することによって、高価な循環ポンプが不要になる

BORAX:

Boiling Reactor Experiment

EBWR:

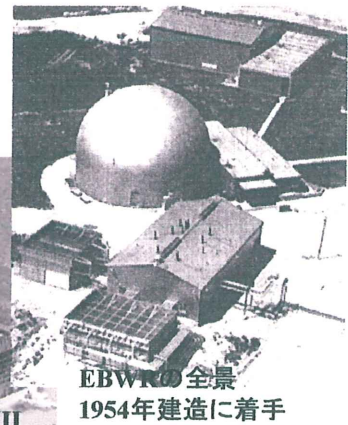
Experimental Boiling Water Reactor



BORAX-Iの沸騰実験
1953年 アイダホ



発電施設BORAX-IV
1956年12月稼働
1958年 3月発電
燃料:セラミックス燃料
炉容器圧力:300psi
発電炉としての沸騰水型炉
の安全性を確認した。



BWR

1956年12月 発電実験炉

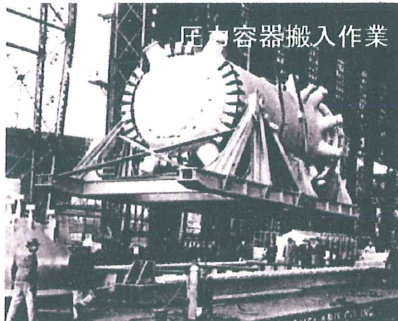
PWR

1955年 1月 動力実用炉
原子力潜水艦(ノーチラス)
原子力による就航実現

吉川秀夫、連載講座 軽水炉プラント-その半世紀の進化のあゆみ、日本原子力学会誌 Vol. 49, No. 10 (2007)

沸騰水型発電炉の開発

- ◆ 米国で最初の原子力発電所は、沸騰水型炉(BWR)ではなく、原子力潜水艦の技術を利用した加圧水型炉(PWR シッピングポート原子力発電所)であった。
- ◆ そのため、沸騰水型炉を開発していたジェネラルエレクトリック社(GE)は、その名声にかけて沸騰水型炉の発電所を開発した。
- ◆ GEは、1957年サンフランシスコ郊外にバレット原子力センター開設し、研究炉(GETR)及び照射後試験施設(PIE施設)を整備した。
- ◆ 最初の沸騰水型原子力発電所(VBWR)をバレット原子力センター内に建設し、1957年8月に臨界に達した。
- ◆ 最初の商業用原子力発電所を完成させたのは1960年6月のことで、イリノイ州のドレスデン原子力発電所(180,000kWe)であった。



吉川秀夫、連載講座 軽水炉プラント-その半世紀の進化のあゆみ、日本原子力学会誌。Vol. 49, No. 10 (2007)

原子力発電の時代へ

PWR型原子力発電所(WH社)

- 1957年 シッピングポート(60,000kWe)
- 1960年 ヤンキー(110,000kWe)
- 1962年 インディアン・ポイントNo1(255,000kWe)

BWR型原子力発電所(GE社)

- 1960年 ドレスデン(180,000kWe)
- 1962年 ビッグ・ロック・ポイント(48,000kWe)
- 1962年 エルクリバー(20,000kWe)
- 1969年 西独 カール原子力発電所(15,000kWe)
- 1963年 日本 動力試験炉(JPDR) (12,000kWe)

BWRは世界市場
獲得に乗り出す。

1960年代以降は原子力発電のブームが到来

米国以外での原子力発電所

ソ連

1954年 オブニンスク黒鉛減速軽水冷却炉 (RBMK 5,000kWe)

VVER(旧ソ連型PWR)とRBMKを併用

VVER: シェル型、軽水冷却・減速、非均質熱中性子炉

RBMK: 沸騰水冷却、黒鉛減速、高出力チャンネル型原子炉

英国

1956年 コールダーホール1号炉 (GCR 60,000kWe)

1963年 ウィンズケール (AGR 36,000kWe)

フランス

1959年 マルクールG2 (GCR 40,000kWe)

1977年 フェッセンハイム (PWR 920,000kWe)

ドイツ(西独)

1961年 カール (BWR 15,000kWe)

1969年 オブリッヒハイム (PWR 357,000kWe)

ベルギー、オランダ、スイス、
スペイン、スウェーデン、
フィンランド、カナダ



カットノン原子力発電所(仏)



セラフィールド

<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2004/html/16022223.html>

http://219.109.2.236/atomica/01/01070508_1.html

原子力開発の環境整備

原子力基本法

- ◆ 日本の原子力に関する最も基本的な法律。
- ◆ 昭和30年12月19日公布、法律第186号。
- ◆ 第1条には、「この法律は、原子力の研究、開発及び利用を推進することによって、将来におけるエネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与することを目的とする。」と書かれている。

原子力予算

- ◆ 昭和30年3月に2億3500万円(ウラン資源調査費を含め2億5000万円)の原子力予算が保守3党から提出され、成立した。

研究開発組織

- ◆ 1955年 財団法人原子力研究所設立。
- ◆ 1955年12月 原子力基本法制定。
- ◆ 1956年1月 原子力委員会設立。
- ◆ 1956年 特殊法人日本原子力研究所設立。(財団法人原子力研究所吸収)
- ◆ 1956年 原子燃料公社設立。(1967年 動力炉・核燃料開発事業団となる)
- ◆ 1957年 放射線医学総合研究所設立。
- ◆ 1957年11月 日本原子力発電株式会社発足。
- ◆ 1957年12月 「発電用原子炉開発長期計画」が原子力委員会により決定。

原子力開発のメッカ(東海村)

研究炉の建設・運転

重水減速研究炉
JRR-2

チェレンコフ現象
JRR-4

JMTR
1968年3月臨界
材料試験炉

JRR-3
1962年9月臨界
国産1号炉

JRR-4
1965年1月臨界

日本初の原子炉
JRR-1

JRR-1
1957年8月臨界

JRR-2
1960年10月臨界

炉心上部
JRR-3

<http://www.ariori.com/documents/2005nuclear.html>

動力試験炉の建設・運転

解体前のJPDR

解体後のJPDR

1963年8月
初臨界

1963年10月26日
初送電

1966年 定検時

1967年 定検時

1968年 定検時
クラック発見

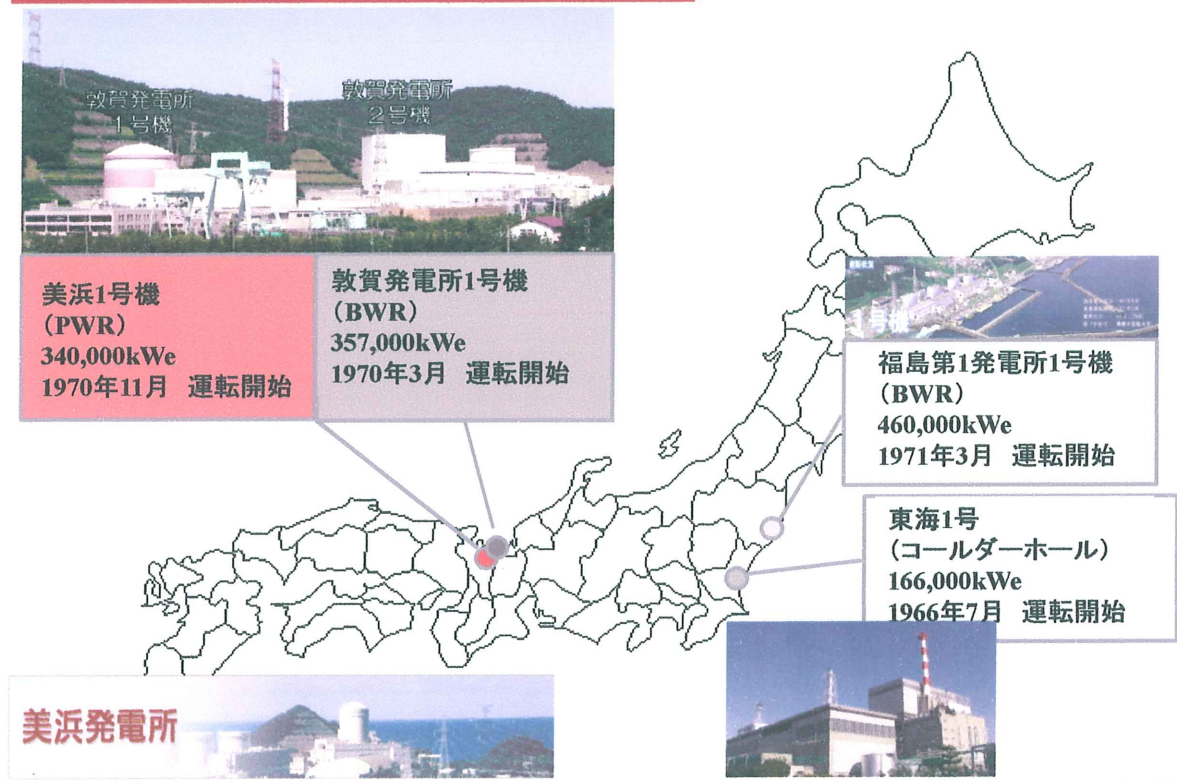
1972年2月
JPDR-II
臨界

1972年5月
発電再開

1976年3月
運転停止

1982年12月
解体届

商用原子力発電所炉の建設・運転



TMI事故

1979年3月28日、米国ペンシルベニア州スリー・マイル原発2号炉で発生

制御用空気系故障→給水ポンプ、タービントリップ→1次系温度・圧力上昇→加圧器逃がし弁「開」→原子炉自動停止(設計どおり)

1次系圧力低下→**加圧器逃がし弁「開固着」**→冷却材流出→1次系圧力低下→ECCS自動起動→**運転員は系は満水と誤認しECCS流量を絞る**

冷却材ポンプ激しく振動→**Bループ1次系冷却材ポンプ続いてAループを手動で停止**→炉心冷却不能(炉心の損傷大)

加圧器逃がし弁元栓「閉」→冷却材流出止まる→ECCS起動→炉心再冠水

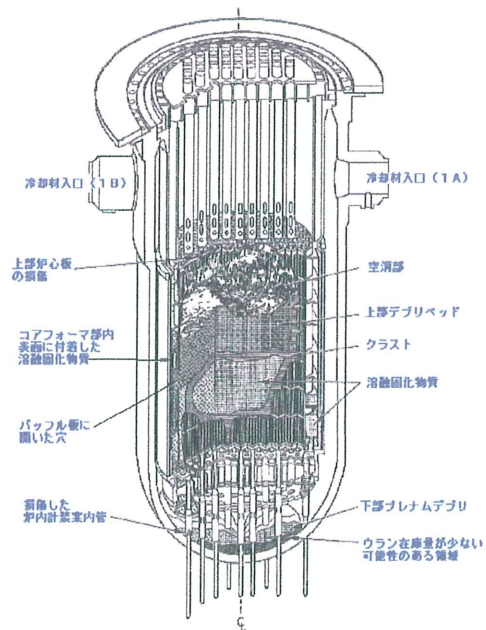


図4 TMI-2 炉容器内の最終状況

(炉心物質の約45% (62t)が溶融し、この内約20tが下部プレナムに落下した。)

[出典] J.M.Broughton, et al.: A Scenario of the Three Mile Island Unit 2 accident, Nuclear Technology, Vol.87, No.1, p.35, 1989

チェルノブイル原発事故

1986年4月26日、旧ソ連チェルノブイル原発4号炉で炉停止状態で計画された実験中に発生

炉出力を700MW(3.2GW)に低下→**給電指令の延長**→キセノン蓄積→炉出力低下→**制御棒引抜(炉心不安定状態)**→出力低下レベルは許容限界→200MWで**実験を決意**

実験開始→外部電源喪失時を模擬→冷却材ポンプへの給電停止→タービン発電機の慣性による給電→冷却材流量低下→炉心蒸気量増加→正のポイド反応度による出力上昇→原子炉停止操作するが間に合わず→核暴走→水蒸気爆発→黒鉛火災→放射性物質放出



チェルノブイル原子力発電所(中
央奥)の遠景、



チェルノブイル原子力発電所(中
央付近)周辺の衛星画像、
1997年撮影



事故後放棄された村



セシウム137の濃度に基づく放
射能汚染地域

<http://ja.wikipedia.org/wiki/>より引用

JCO事故

1999年9月29日、茨城県東海村JCO東海事業所
転換試験棟で臨界事故が発生

高濃縮ウラン硝酸溶液を制限量を超えて沈殿槽に
投入したため臨界発生

許可されたものとは異なる手順による作業
(バケツを使用して核物質を取り扱う)

作業員の臨界に関する知識不足
(制限量を超えて核物質を取り扱う)

臨界を止める対策が施されていない設備
(沈殿槽周りの冷却水を抜き臨界停止)

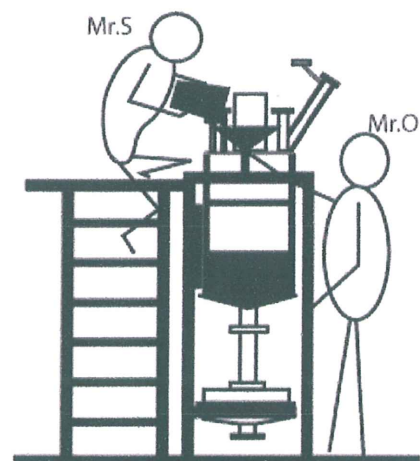


図2 事故時の作業の様子
(JCO臨界事故患者の
初期治療より)

法令・規則の遵守 従業員の教育 適切な設備対応

TMI事故、チェルノブイル原発事故、JCO事故

- 大小の差を問わず事故が起これば、2度と同じような事故が起きないように対策が取られる。
 - INPO(米国原子力発電運転協会)
 - TMI事故を受け1979年12月に米国原子力発電事業者で設立
 - 最高レベルの安全性と信頼性の達成を目標
 - 専門家によるプラント評価など各種支援活動
 - OSART(運転管理調査チーム)
 - 1982年にIAEAが組織化
 - 8分野の専門家調査団の派遣
 - WANO(世界原子力発電事業者協会)
 - チェルノブイル事故を受け、1989年5月に世界規模で設立
 - 主な活動はピアレビュー
 - INSAF(世界核燃料安全ネットワーク)
 - JCO事故を受け、2000年4月に国内外核燃料サイクル事業者で設立
 - 安全についての情報交換等を目指す
 - NS net(ニュークリアセイフティネットワーク)現在:日本原子力技術協会
 - JCO事故を受け、1999年12月に国内原子力事業者で設立
 - 主な活動はピアレビュー、安全キャラバン、トラブル事例収集等
-