

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 76 (1958)
Heft: 19

Artikel: Das Atomenergie-Zentrum in Marcoule
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-63976>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Das Atomenergie-Zentrum in Marcoule^{*)}

Hierzu Tafeln 25 und 26

DK 621.039.421

Der Fünfjahresplan des Französischen Atomenergie-Kommissariates vom Jahre 1952 sah in einer ersten Etappe den Bau von zwei Reaktoren G_1 und G_2 zur ausschliesslichen Herstellung von Plutonium vor, das der Versorgung weiterer, später zu erstellender Reaktoren dienen sollte, insbesondere solcher der Electricité de France zur Erzeugung von elektrischer Energie. Während der Projektstudien erwies es sich als zweckmässig, die von den genannten Reaktoren entwickelte Wärme zur Energieerzeugung auszunützen. Dementsprechend wurde der Reaktor G_1 , bei dem am 7. Januar 1956 die erste Kettenreaktion angelaufen ist und der für eine Wärmeleistung von 40 MW gebaut ist, mit einem Turbogenerator von 5 MW ausgerüstet. Das Kühlsystem und die übrigen Hilfsbetriebe benötigen allerdings eine Gesamtleistung von 8 MW, so dass sich eine negative Energiebilanz ergibt. Demgegenüber soll der Reaktor G_2 , der eine Wärmeleistung von 150 bis 200 MW aufweisen wird, nach Abzug aller Hilfsantriebe eine Generatorenleistung von rd. 25 MW ans Netz abgeben können. In einer zweiten Etappe war die Aufstellung eines dritten Reaktors G_3 in Aussicht genommen, der mit G_2 identisch ist. Inzwischen haben die Arbeiten der zweiten Etappe bereits begonnen. Gleichzeitig wird eine Anlage zur Extraktion von Plutonium und zur Regeneration der Spaltstoffstäbe angegliedert. Als Aufstellungsort des ganzen Zentrums wählte man ein Gelände in der Nähe der Rhone zwischen Pont-Saint-Esprit und Avignon, genannt Marcoule, das, wie aus Bild 2 ersichtlich ist, genügend weit von grösseren Ortschaften entfernt liegt. Bild 1 gibt eine Uebersicht über die gesamten Anlagen und Bild 3 zeigt die Gebäudeanordnung. Die Bilder 1, 7, 12 und 15 befinden sich auf den Tafeln 25 und 26.

1. Der Reaktor G_1

Der Reaktor G_1 dient vor allem der Abklärung der bei Bau und Betrieb einer solchen Anlage sich ergebenden Probleme, dem Sammeln von praktischen Erfahrungen, der Personalaus- und der Herstellung von Plutonium sowie radioaktiver Präparate. Er ist in den Bildern 4 und 5 in Aufriss und Grundriss dargestellt. Als Spaltstoff dient natürliches Uran, als Mode-

rator Graphit, als Kühlmittel Luft unter leichtem Ueberdruck. Die Wahl dieses Kühlmittels drängte sich im Zeitpunkt der Projektierung auf; denn es erlaubte einen einfachen Aufbau des Reaktors und liess eine rasche Inbetriebnahme erwarten. Diese war erwünscht, um die Konstruktions- und Betriebserfahrungen beim Bau der Reaktoren G_2 und G_3 ausnützen zu können. Der grosse Energiebedarf der Luftkühlung wurde durch strömungsgünstige Formen der luftdurchströmten Teile tunlichst gesenkt.

Die Uranfüllung wiegt 100 t. Sie besteht aus stabförmigen Elementen von 100 mm Länge und 26 mm Durchmesser, von denen eine grössere Zahl in je eine Hülle aus Magnesium von 3800 mm Länge eingeschlossen sind. Diese Hüllen tragen aussen je acht radialgestellte, etwa 16 mm hohe Längsrippen für die Wärmeabgabe an die Luft, so dass sich ein Aussendurchmesser von 62 mm ergibt. Die derart aufgebauten Stäbe werden in die horizontalen Bohrungen von 70 mm Durchmesser des Moderators eingebaut und bilden mit diesem zusammen den aktiven Teil des Reaktors.

Der Moderator besteht aus einem würfelförmigen Graphitkörper von 8840 mm Länge, der im Schnitt senkrecht zu den Bohrungen für die Spaltstoffstäbe achteckig ist; der diesem Achteck umschriebene Kreis hat einen Durchmesser von 9600 mm. Der äussere reflektierende Teil des Moderators ist im Mittel 660 mm dick. Dieser Körper wird durch einen mittleren Spaltraum von 80 mm Breite in zwei gleiche Hälften geteilt. Jede Hälfte enthält 1337 Bohrungen, durch welche die Kühlluft vom Spaltraum nach beiden Aussenseiten strömen kann und in welche die 3800 mm langen Spaltstoffstäbe eingebaut sind.

Als Strahlenschutz dient eine innere thermische Abschirmung aus Stahl und eine äussere biologische Abschirmung aus Beton. Der ganze Reaktor wiegt rd. 30 000 t und ruht auf einem Sockel, dessen Herstellung rd. 10 000 m³ Beton und rd. 2000 t Eisen benötigt hat. Die Eisenkonstruktion des Graphitmoderators und der thermischen Abschirmung besteht aus rd. 1500 t Stahl und 500 t Gusseisen. Die biologische Abschirmung ist im Mittel 2,25 m dick. Trotz dieser grossen Massen war eine hohe Genauigkeit einzuhalten. So durften die Abweichungen der Betonkonstruktion nicht mehr als 2 cm betragen. Auf Bild 6 ist der Reaktor von der Seite dargestellt, auf der die Uranstäbe eingesetzt werden. Bild 7 zeigt das grosse Gebäude, indem der Reaktor aufgestellt ist; davor befinden sich die niedrigen Gebäude für die Hilfsbetriebe (Kühlluftgebläse, Messeinrichtungen, Kommandoposten); links ist das 100 m hohe Hochkamin sichtbar.

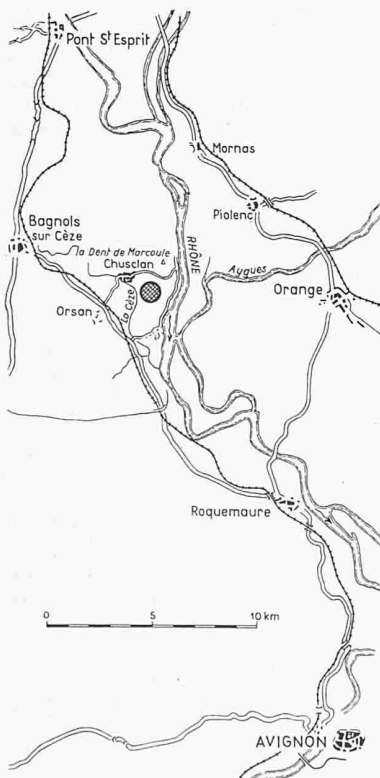
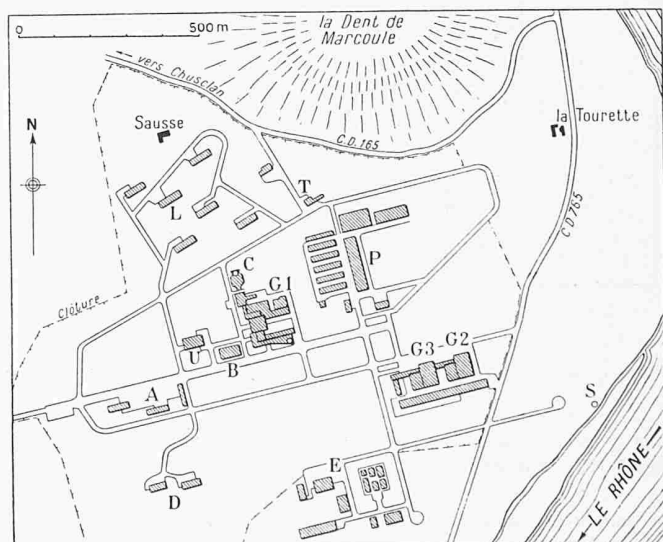


Bild 2 (links). Lageplan 1:350 000. Die schraffierte Kreisfläche bezeichnet den Ort des Atomenergie-zentrums

Bild 3. Gebäudeanordnung 1:20 000. A Verwaltungsgebäude, B Werkhallen zur Bearbeitung der Graphitstäbe, C Hochkamin zum Reaktor G_1 , D soziale Dienste, E Anlagen für die Behandlung der Spaltstoffe, L Laboratorien, P Plutoniumfabrik, S Pumpstation, T Transformatorstation

^{*)} Nach einer Beschreibung in «Le Génie Civil» vom 1. 10. 57 mit Ergänzungen.



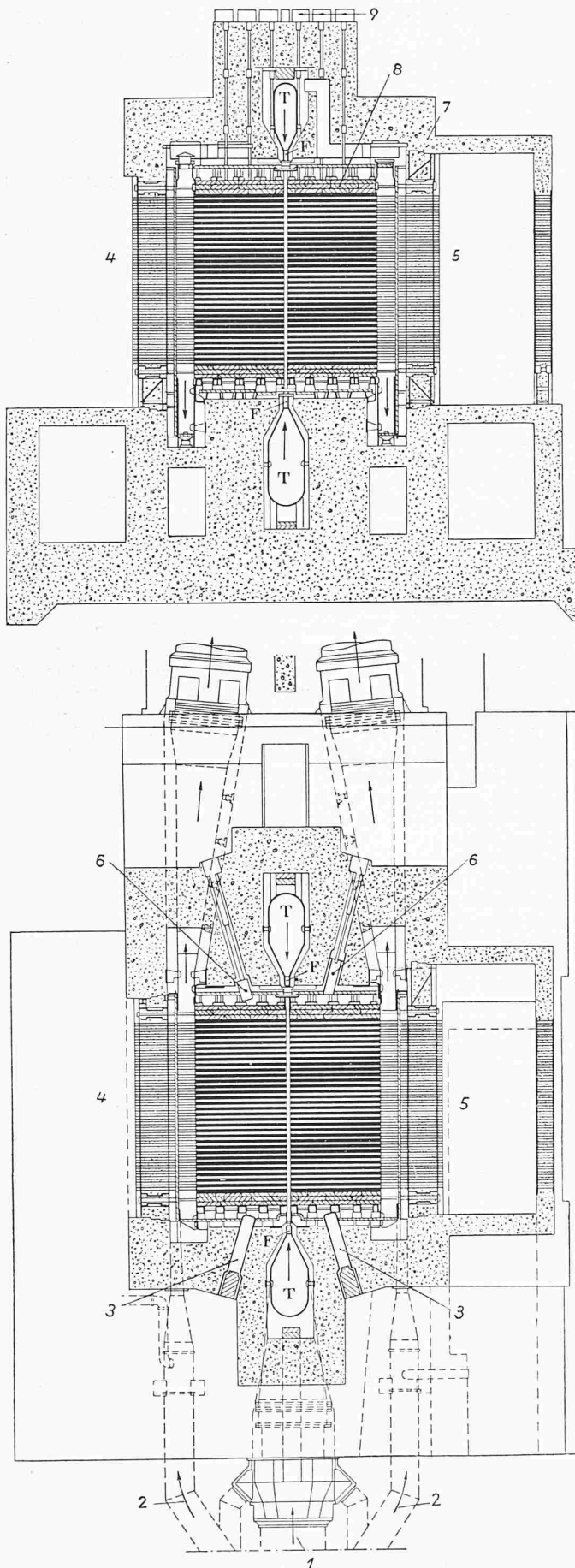


Bild 4. Schematischer Vertikal- und Horizontalschnitt durch den Reaktor G_1 , Masstab 1:300

- | | |
|---|---|
| 1 Eintritt der Kühlluft für den Reaktorkern | 2 Eintritt der Kühlluft für die Abschirmung |
| | 3 Öffnung für Versuchszwecke |

Zum Umwälzen der Kühlluft dienen drei Gebläse, von denen jedes $80 \text{ m}^3/\text{s}$ gegen einen Druck von 2500 mm WS fördert und durch einen Asynchronmotor von 2600 kW bei 2850 U/min und 5500 V angetrieben wird. Eine vierte Gruppe dient als Reserve. Um möglichst staubfreie Frischluft zu erhalten, befindet sich die Absaugöffnung am oberen Ende eines 25 m hohen Kamins. Die Luft durchstreicht anschliessend Filter mit einem Ausscheidungswirkungsgrad von 97% , wird dann vom Gebläse nach Kühltürmen gefördert, in denen sie sich im Sommer auf $+18^\circ \text{C}$ an Kühlwasser abkühlt, das über Füllkörper aus Metall herunterrieselt. Die Kühlwassermenge ändert sich je nach der Kühlerleistung; sie kann bis auf $200 \text{ m}^3/\text{h}$ gesteigert werden.

Vor dem Eintritt in den Reaktor wird die Luft zum zweitenmal gefiltert, strömt dann in den Ringkanal T (Bilder 4 und 5), verteilt sich gleichmässig über den ganzen Umfang des Reaktors und tritt durch die Uebergangsstücke F in den mittleren Spaltraum ein. Der Uebergang von diesem in die Bohrungen in den beiden Moderatorblöcken wurde durch Modellversuche abgeklärt; er musste derart durchgebildet werden, dass alle 2674 Bohrungen möglichst genau gleichviel Kühlluft erhalten. Auf beiden Aussenseiten tritt die warme Luft in Sammelräume über, die unten mit den Leitungen verbunden sind, die nach dem Wärmeaustauscher führen (Bild 4). Durch den Zwischenraum zwischen thermischer und biologischer Abschirmung fliesst sekundäre Kühlluft.

Die austretende warme Luft durchströmt den Wärmeaustauscher der Energiegewinnungsanlage, anschliessend einen Filter zum Zurückhalten von radioaktivem Staub und tritt dann durch ein 100 m hohes Kamin von 10 m Innendurchmesser ins Freie aus. Dieser Filter besteht aus zwei parallel geschalteten Teilen. Als Filtermasse dient Glaswolle. Das Kamin ist aus einzelnen Ringen von 8 bis 12 cm Wandstärke aus vorgespanntem Beton aufgebaut. Es trägt oben einen Hut, der eine gute Durchmischung der austretenden Luft mit der Umgebungsluft bewirken soll. Insbesondere verhindert der Hut das Absinken von Luft, die noch mit Resten von radioaktivem Staub verunreinigt ist, längs des Kamins zum Boden.

2. Die Anlage zur Energiegewinnung

Wie bereits erwähnt, hatte man den Reaktor G_1 ursprünglich ohne Energiegewinnung projektiert, um dessen Inbetriebnahme nicht zu verzögern und dessen Betriebssicherheit nicht zu gefährden. Diese Gesichtspunkte blieben auch nachher massgebend und beeinflussten die Konstruktion der Gewinnungsanlage in wesentlichen Teilen. Sie ist nach dem auf Bild 8 dargestellten Prinzipschema aufgebaut. Darnach tritt das Betriebswasser mit rd. 60°C und rd. 20 atü in den Wärmeaustauscher ein, der für eine grösste zu übertragende Wärmemenge von $31,5 \text{ Mio kcal/h}$ bei den Wassertemperaturen $60/200^\circ \text{C}$ (Menge $61,2 \text{ kg/s}$) und den Lufttemperaturen $80,5/220^\circ \text{C}$ (Menge 257 kg/s) gebaut ist. Das heisse Druckwasser gelangt dann durch das Entspannungsventil 4 I in das Ausdampfgefäss 2 I, in dem ein Druck von $5,64 \text{ ata}$ entsprechend einer Temperatur von 156°C herrscht. Dabei verdampfen von den insgesamt $61,2 \text{ kg/s}$ $5,53 \text{ kg/s}$; der Rest gelangt durch das Ventil 4 II in das Gefäss 2 II, das unter $1,57 \text{ ata}$ entsprechend 112°C steht. Schliesslich ist noch eine dritte Verdampfungsstufe mit $0,318 \text{ ata}$ entsprechend 70°C vorhanden. Die restliche Wassermenge, die nicht verdampft, wird von einer Extraktionspumpe 5 dem Speisewasserbehälter 6 von 50 m^3 Inhalt zugeführt, an den die Speisepumpe 7 angeschlossen ist.

Bei diesem Verfahren findet im Wärmeaustauscher keine Verdampfung statt. Es kann sich in ihm kein Kesselstein bilden, da stets das selbe Wasser im Kreislauf steht. Somit ist kein Absinken der Wärmeübergangszahl zu befürchten. Schliesslich lassen sich die isolierten Leitungen für den Wärmetransport bei Heisswasser mit wesentlich kleineren Durchmessern ausführen als bei Dampf. Man ist so in der Disposition der Anlage freier. Mit Vorteil verlegt man die Ausdampfgefässe in die Nähe der Turbine. Allfällige Reparaturen im Austausch erfordern wegen radioaktivem Staub im luftdurchströmten Teil grosse Vorsicht und längere Warte-

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 4 Einfüllseite des Reaktors | 9 Nuiden für die Regulierstäbe |
| 5 Entladekammer | T Reinigungskanal für die Kühlluft |
| 6 Ionisationskammer | F Uebergangsstück zum Spalt- |
| 7 Biologische Abschirmung | raum |
| 8 Thermische Abschirmung | |

zeiten. Dank dem gewählten Verfahren können sie weitgehend vermieden werden. Um den Reaktor auch bei einer Störung an der Energiegewinnungsanlage voll betreiben zu können, überbrückt eine Bypassleitung mit den nötigen Abschlüssen den Wärmeaustauscher, Bild 6.

Der Wärmeaustauscher besteht aus neun Elementen von $12,0 \cdot 10,74$ m Querschnitt und rd. 0,80 m Tiefe, die luftseitig hintereinander geschaltet sind. Jedes Element kann wasserseitig durch je einen Schieber am Ein- und am Austritt für sich abgeschlossen werden. Es ist aus einer grösseren Zahl übereinander angeordneten Rohrlagen aufgebaut; jede Lage weist vier hintereinandergeschaltete Stahlrohre von 26 mm Aussendurchmesser und 2,5 mm Wandstärke auf, die mit quadratischen Kühlrippen 65/65 mm dicht besetzt sind. Die Austauschfläche wird zu $58\,000\text{ m}^2$ angegeben. Insgesamt sind luftseitig $4 \times 9 = 36$ Rippenrohre hintereinander geschaltet. Die mittlere Luftgeschwindigkeit beträgt 6,95 m/s, der Druckhöhenverlust 155 mm WS. Auf der Wasserseite lauten die entsprechenden Zahlen 1,18 m/s und $4,2\text{ kg/cm}^2$. Der Apparat ist von der Société des Condenseurs Delas geliefert worden.

Die Hauptdaten der Dampferzeugungsanlage, die ein Fabrikat der Société de Récupération Thermique et Epuration Cochrane darstellt, sind in Tabelle 1 zusammengestellt und zwar sowohl für normalen als auch für Spitzen-Notbetrieb, wie er bei Stromunterbrüchen im Netz während 30 Minuten aufrecht erhalten werden soll. Man hätte die Stufenzahl erhöhen und dadurch eine bessere Ausbeute erhalten können. Der praktische Gewinn wäre wegen zunehmenden Verlusten gering ausgefallen und hätte die höheren Kosten nicht mehr gerechtfertigt. Auch die Rücksicht auf die Betriebssicherheit auferlegt eine Beschränkung der Zahl der Organe, die immer auch Störursachen sein können.

Die Dampfdrücke in den einzelnen Stufen werden durch Verändern der eingespritzten Wassermengen mittels der Entspannungsventile 4 geregelt. Um diese Regelung zu erleichtern und ihre Trägheit zu verringern, sind getrennte Wasserausgleichgefässe 3 angeordnet worden. Sie sorgen ausserdem dafür, dass den Ventilen 4 stets Wasser vorgeschaltet bleibt und so kein Dampf durchströmen kann.

Die von der Firma Rateau gebaute Turbine ist vertikalachsrig mit Hochdruckteil oben und Niederdruckteil unten. Diese Anordnung erleichtert die Wasserausscheidung aus den verschiedenen Stufen, die alle im nassen Gebiet arbeiten. Die Turbine ist nach dem Aktionsprinzip gebaut und weist insgesamt 14 Stufen auf, nämlich sechs zwischen den Eintrittsstutzen des ersten und zweiten Ausdampfers und fünf zwischen denen des zweiten und dritten. Die Kondensattemperatur beträgt 27°C , der Druck $0,035\text{ ata}$, die Drehzahl der Turbine 3000 U/min. Der direkt gekuppelte Generator von Alsthom leistet 5750 kW bei $\cos \varphi = 0,8$. Davon zehren die Hilfsbetriebe 750 kW auf, so dass die verfügbare Nettoleistung auf 5000 kW absinkt. Die Klemmenspannung beträgt 5500 V.

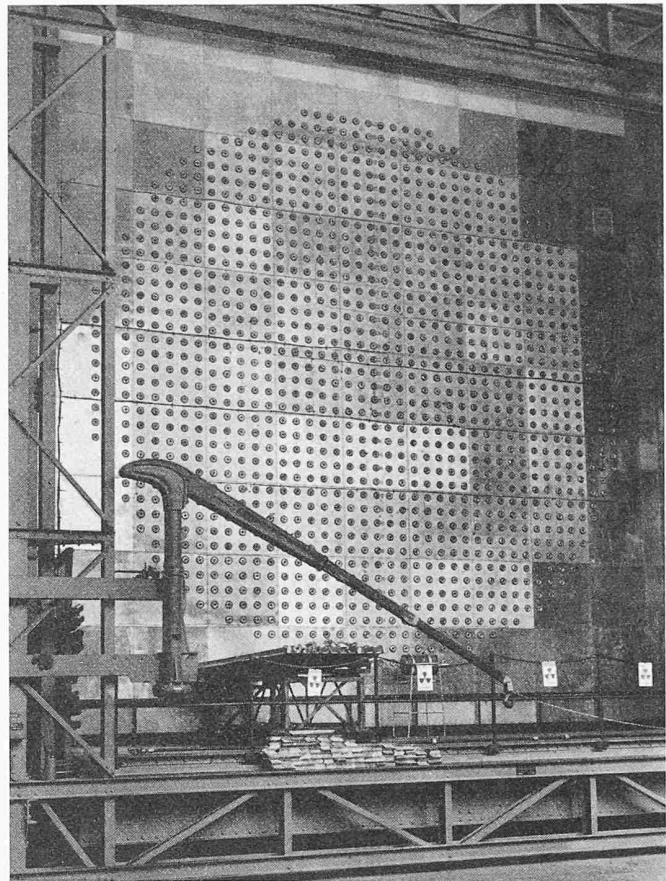


Bild 5. Ansicht des Reaktors G_1 von der Einfüllseite

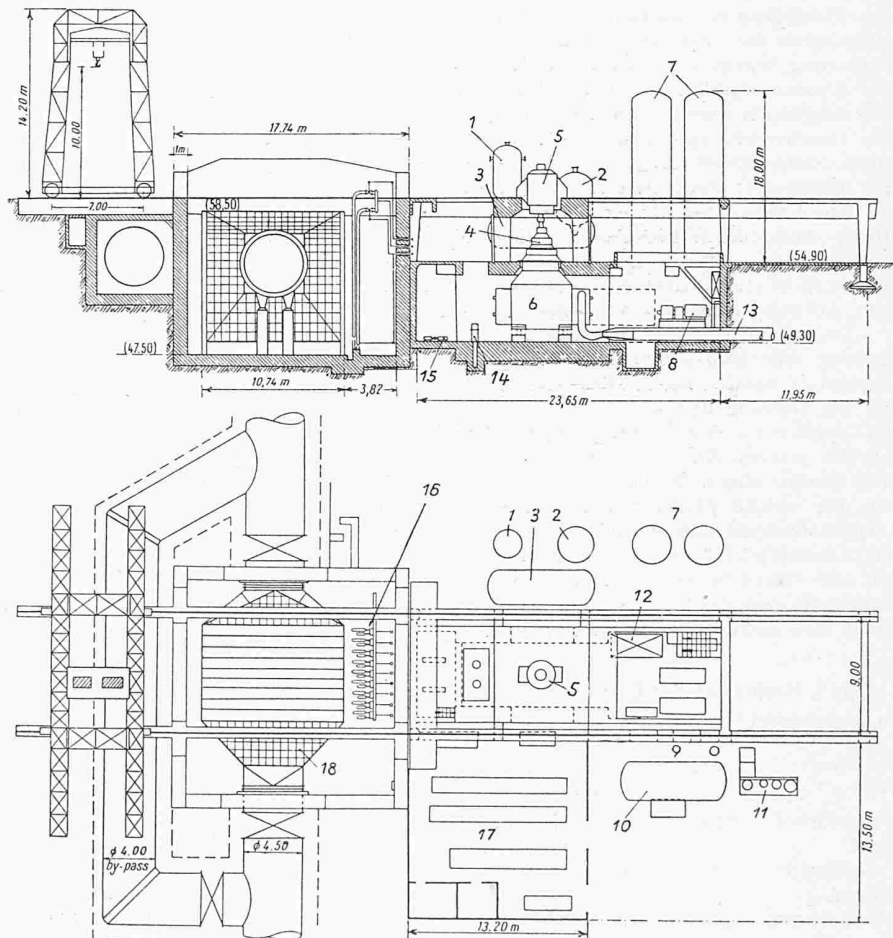


Bild 6. Schematischer Aufriss und Grundriss der Energiegewinnungsanlage des Reaktors G_1

- | | |
|---|--|
| 1 Hochdruck-Ausdampfgefäss | 12 Ölbehälter |
| 2 Mitteldruck-Ausdampfgefäss | 13 Kühlwasserleitungen zu 6 |
| 3 Niederdruck-Ausdampfgefäss | 14 Kondensatpumpe zu 6 |
| 4 Dampfturbine | 15 Extraktionspumpe zu 3 |
| 5 Generator | 16 Abscheider zur Ueberführung des in den einzelnen Turbinenstufen ausgeschiedenen Kondensates |
| 6 Kondensator | 17 Elektrische Apparate |
| 7 Speicher | 18 Wärmeaustauscher mit Luftleitungen |
| 8 Speisewasserpumpen | |
| 9 Luftpumpen | |
| 10 Speisewasserbehälter für 50 m ³ | |
| 11 Speisewasser-Aufbereitung | |

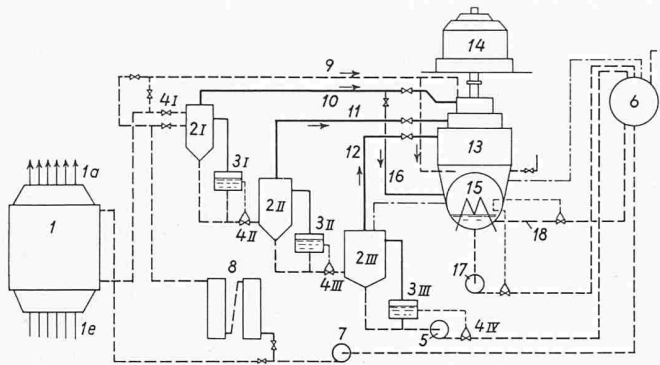


Bild 8. Schema der Energiegewinnungsanlage des Reaktors G₁

- | | |
|---|---|
| 1 Wärmeaustauscher | 8 Speicher für heisses Druckwasser |
| 1e Eintritt der heissen Luft (200° C) | 9 Sperrflüssigkeit für Turbinenstopfbüchsen |
| 1a Austritt der gekühlten Luft (80° C) | 10 Hochdruck-Dampfleitung |
| 2 Ausdampfgefässe bei der Turbine | 11 Mitteldruck-Dampfleitung |
| 3 Ausgleichgefässe | 12 Niederdruck-Dampfleitung |
| 4 Entspannungsventile vor den Ausgleichgefässen | 13 Vertikalachsige Dampfturbine |
| 4 IV Regulierventil zu 6 | 14 Generator |
| 5 Extraktionspumpe | 15 Kondensator |
| 6 Speisewasserbehälter | 16 Zweigleitung |
| 7 Speisewasserpumpe | 17 Kondensatpumpe |
| | 18 Zusatzwasserleitung |

Der Turbinenregler steuert das Wassereintrittsventil 4 I von dem Ausdampfgefäss 2 I, das seinerseits wieder die entsprechenden Wasserventile vor den Gefässen 2 II und 2 III beeinflusst, und zwar unter Berücksichtigung der Wasserstände in den zwischen die Ausdampfgefässe eingeschalteten Ausgleichgefässe 3. Das Regulierventil 4 IV am Austritt aus dem Ausdampfgefäss 2 III wird vom Wasserstand im letzten Ausgleichgefäss 3 III gesteuert.

Zwei Schnellschlussorgane sind jedem der drei Dampfeintrittsstutzen der Turbine vorgeschaltet, die bei plötzlichem Abschalten des Generators schliessen und so die Drehzahlsteigerung begrenzen, auch wenn die Wassereintrittventile vor den Ausdampfgefässen infolge Störung offen bleiben sollten. Das Schliessen dieser Schnellschlussorgane wird sowohl durch den Geschwindigkeitsregler als auch durch einen unabhängigen Sicherheitsregler ausgelöst. Sie sind als Drehklappen mit minimalem Strömungswiderstand ausgebildet.

Das Kühlwasser für den Oberflächenkondensator wird der Rhone entnommen. Die Fassung liegt um etwa 23 m tiefer als der Kondensator. Das Gefälle des zurückfliessenden Wassers wird in einer Turbine ausgenutzt, die mit der Pumpe und dem Antriebsmotor zusammengekuppelt ist.

Die Energiegewinnungsanlage ist für eine Spitzenleistung von 8000 kW vorgesehen, die während 30 Minuten abgegeben werden kann. Diese Leistung genügt, um im Notfall die Gebläse und die andern Hilfsbetriebe des Reaktors, mit Ausnahme der Wasserpumpen für die Rückkühltürme, mit der nötigen Energie zu versorgen. Dabei wird das nötige Kühlwasser einem Hochreservoir von 2000 m³ entnommen, das für solche Notfälle eingerichtet wurde. Das für den Ueberlastbetrieb nötige zusätzliche Heisswasser zum Speisen der Ausdampfgefässe wird in zwei Speichern von insgesamt 135 cm³ Inhalt bereitgehalten. Dank der sehr guten Wärmeisolierung sind die Verluste dieser Speicher klein; sie werden durch eine elektrische Heizung ersetzt.

Tabelle 1. Hauptdaten der Dampferzeugungsanlage, die dem Reaktor G₁ angegliedert ist.

Belastung Stufe		Normal			Ueberlast		
		I	II	III	I	II	III
Dampfdruck	ata	5,64	1,57	0,318	7,0	2,14	0,45
Verd.							
Temperatur	° C	156	112	70	164	121,7	78,2
Eingef.							
Wassermenge	kg/s	61,2	55,67	50,69	92	85,13	77,06
Erzeugte							
Dampfmenge	kg/s	5,53	4,68	3,85	6,87	7,07	6,11

Wie ersichtlich, erfüllt die Energiegewinnungsanlage, deren Kosten zu rund 600 Mio fr. Fr. angegeben werden, verschiedene Aufgaben: Sie erzeugt eine beachtliche Energiemenge. Sie macht ferner den Betrieb des Reaktors weitgehend unabhängig vom Netz, bei dem Stromunterbrüche während mehr als 30 Minuten nur äusserst selten auftreten. Und schliesslich stellt sie hinsichtlich Konstruktion, Kondensatauscheidung und Verbindung mit der Dampferzeugungsanlage eine Erstaussführung dar, die erlaubt, praktische Erfahrungen zu sammeln. Diese werden bei der Inbetriebsetzung der grösseren Anlagen besonders wertvoll sein.

Die Anlage ist im Freien aufgestellt, wie das in ähnlicher Weise bei einzelnen amerikanischen Wärmekraftwerken auch schon ausgeführt wurde.

3. Mess-, Steuer- und Sicherheitsvorrichtungen des Reaktors G₁

Von diesen sehr umfangreichen Einrichtungen seien hier lediglich einige der wichtigsten beschrieben. Der Neutronenfluss im Reaktor wird mit Ionisationskammern gemessen, die kompensiert und an elektronische Röhren angeschlossen sind. Diese wirken über Gleichstromverstärker auf die Anzeige- und Registriergeräte. Die γ -Strahlung wird ebenfalls mit Hilfe von Ionisationskammern gemessen.

Besondere Bedeutung kommt den Temperaturmessungen zu. Dazu dienen Thermoelemente (Eisenkonstantan), die an verschiedenen Punkten des Reaktors, insbesondere in allen 2674 Kanälen angeordnet sind. Dadurch ist es möglich, allfällige Störungen zu lokalisieren. Von diesen Temperaturmessstellen sind nur eine beschränkte Zahl mit Registriergeräten verbunden. Um die Zahl dieser Geräte zu begrenzen, werden mehrere dieser Messstellen mittels automatisch wirkender, rotierender Kontaktapparate je auf ein Registriergerät geschaltet. Für Sicherheitssteuerkreise sind Bimetallamellen verwendet worden.

Da der grösste Teil der Messgeräte mit elektronischen Empfängern ausgerüstet ist, die eine sehr genau konstant gehaltene Spannung erfordern, wurde zur Speisung dieser Geräte eine besondere Maschinengruppe aufgestellt, die aus einem Synchron-Generator von 100 kVA und einem Motor besteht. An das Netz dieses Generators sind die einzelnen Apparate über ebenfalls elektronisch gesteuerte Spannungsregler angeschlossen, die diesen Apparaten individuell angepasst sind. Der Hilfsgenerator wird bei Stromausfall im Netz durch einen Dieselmotor angetrieben, der automatisch anläuft.

Die Spaltvorgänge im Reaktor werden durch Verschieben von 36 vertikalen Stäben aus Borkarbid geregelt. Diese sind an Kabeln aufgehängt, und ihre Eintauchtiefe lässt sich durch elektrisch angetriebene Winden verändern. Sollte der Reaktor in eine gefährliche Betriebsphase geraten, so fallen die Regulierstäbe durch ihr Eigengewicht nach unten und stellen den Reaktor ab. Dieser Schnellschlussvorgang wird durch Lösen der elektromagnetischen Kupplungen eingeleitet, die zwischen den Winden und den Antriebsmotoren eingebaut sind. Er vollzieht sich auch dann, wenn zufälligerweise kein Netzstrom verfügbar sein sollte.

Eine ernste Gefährdung tritt ein, wenn die Magnesiumhülle eines Uranstabes reissst, weil dann das Uran mit der Kühlluft in Verbindung tritt und oxydiert. Dadurch erwärmt sich der Stab beträchtlich, und die Oxydation beschleunigt sich bis zur Verbrennung. Da das dabei gebildete Uranoxyd mehr Raum einnimmt, wird zugleich auch der Luftdurchgang gedrosselt, so dass sich auch der Moderator stark erhitzt. Unter den verschiedenen Vorschlägen, Störungen solcher Art rasch zu erkennen, entschied man sich beim Reaktor G₁ für jenen, nach welchem die Radioaktivität von Luftproben gemessen wird, die periodisch allen 2674 Kanälen entnommen werden. Hierfür ist jeder Kanal durch eine kleine Leitung mit einem Messgerät verbunden, das bei Erreichen einer bestimmten Radioaktivität ein Notsignal auslöst.

Die Mess- und Kontrollgeräte sind in einem Kommandoraum zusammengefasst. Dabei befinden sich die Mess- und Steuergeräte des Reaktors auf einem Messpult, während jene der Energiegewinnungsanlage auf einem Tableau angeordnet sind. In einem andern Raum ist ein weiteres Pult aufgestellt, von dem aus die Vorrichtungen zum Ein- und Ausbauen der Uranstäbe gesteuert werden, Bild 9. Insgesamt wurden für Mess-, Steuer- und Sicherheitseinrichtungen 150 km Kabel verlegt, die bis zu 224 Adern enthalten, weiter 660 km Draht für den Anschluss von Thermoelementen und Bimetallstreifen sowie 40 km Kupferrohre.

Das Französische Atomenergiezentrum in Marcoule

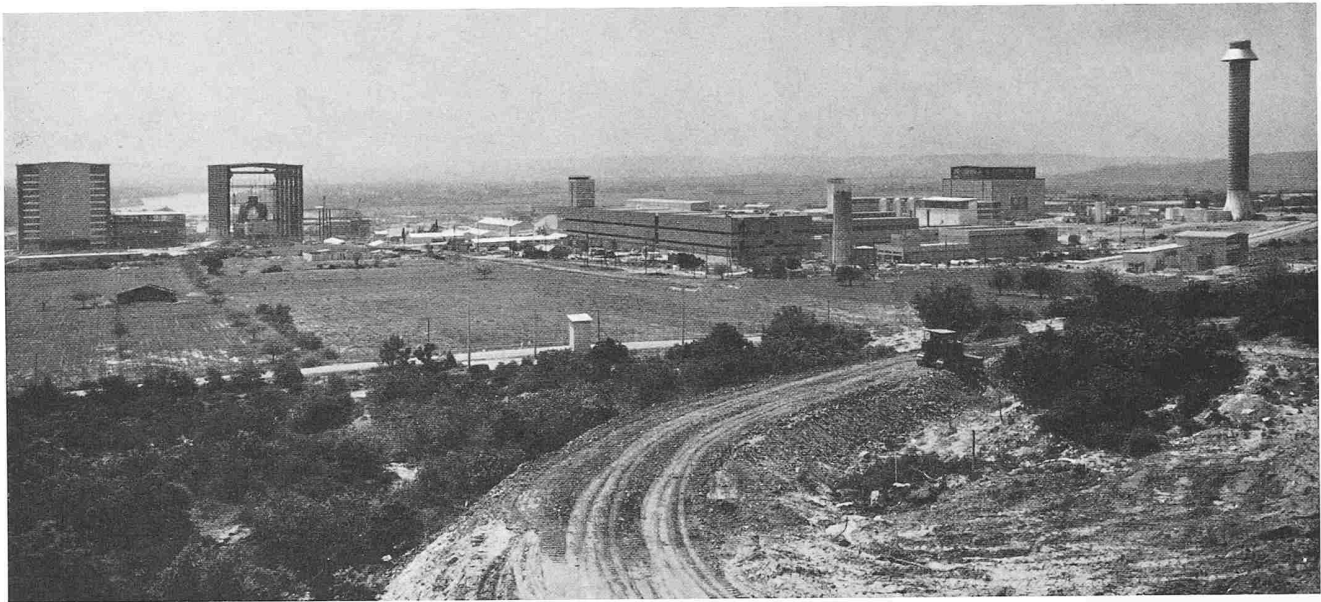


Bild 1. Gesamtansicht des Französischen, im Bau befindlichen Atomenergie-Zentrums von Marcoule. Links die Gebäude für die Reaktoren G_2 und G_3 , in der Mitte die Anlagen für die Extraktion von Plutonium, rechts hinten das Gebäude für den Reaktor G_1 , ganz aussen der Hochkamin für dessen Kühlluft.



Bild 7. Das Gebäude des Reaktors G_1 , davor die Gebäude für die Hilfsanlagen, links der Hochkamin von 100 m Höhe.

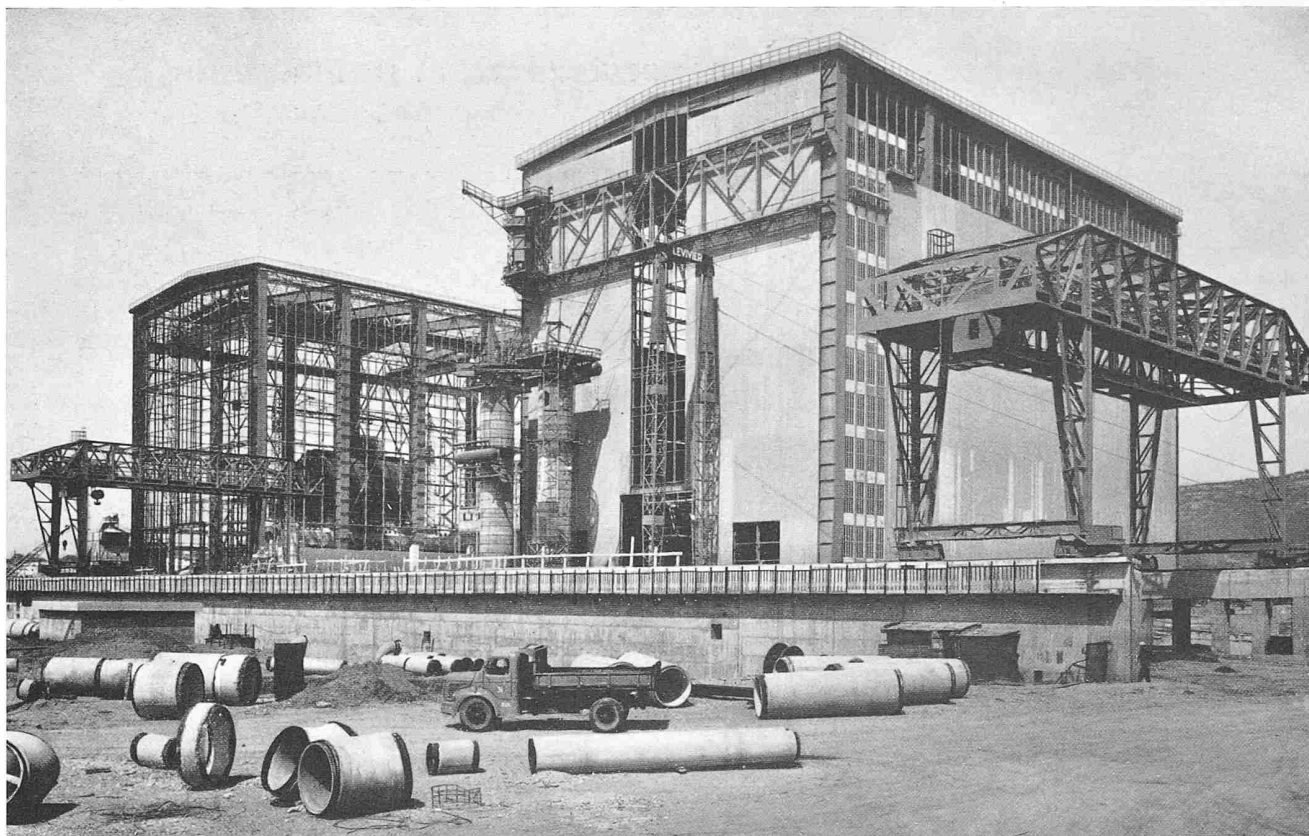


Bild 12. Die Hallen für die Reaktoren G₂ und G₃ im Bau. Vor der Halle im Vordergrund sind zwei der vier Wärmeaustauscher sichtbar.



Bild 15. Das Gebäude der Plutonium-Gewinnungsanlage im Bau.

Die Photos wurden uns vom Commissariat à l'Energie Atomique, Paris, in verdankenswerter Weise überlassen.

4. Bisherige Betriebsergebnisse

Ueber die Betriebsweise des Reaktor G_1 liegt ein Bericht des Commissariat à l'Energie Atomique vom 29. Januar 1958 vor, wonach die Ingenieure und Physiker an diesem Reaktor seit seiner ersten Inbetriebsetzung am 7. Januar 1956 in fast ununterbrochener Arbeit ein grosses Versuchsprogramm erfüllt hatten, dessen Ergebnisse in etwa 15 Berichten niedergelegt sind. Zu diesem Programm gehörte die praktische Erprobung der ganzen Apparatur, die Herstellung von Plutonium, das Sammeln von Erfahrungen und das Abklären von Einzelfragen, die sich bei der Konstruktion der Reaktoren G_2 und G_3 stellten, ferner die Personalinstruktion sowie schliesslich die Inbetriebsetzung der Energiegewinnungsanlage, die Ende September 1956 stattfand.

Am 26. Oktober 1956 trat leider eine Störung auf, indem die Hülle eines Spaltstoffelementes riss. Der Reaktor musste während einiger Wochen abgestellt werden. Als Ursache ist eine örtliche Ueberhitzung festgestellt worden, die infolge Mangel an Kühlluft in einem einzigen Kanal entstanden ist. Entweder ist in diesem Kanal ein Fremdkörper eingedrungen oder die betreffenden Spaltstoffelemente haben sich verschoben und dadurch die Luftströmung gedrosselt. Jedenfalls ist die Magnesiumhülle vom Entzündungspunkt auf seine ganze freie Länge verbrannt.

Nach gründlicher Revision und Instandstellung der Schäden lief der Reaktor am 15. Januar 1957 wieder an und arbeitete bis zum 1. November 1957 während 220 auf insgesamt 283 Tagen mit verschiedenen Belastungen im industriellen Betrieb. In dieser Zeit wurde er insgesamt 35 mal abgestellt, davon 12 mal willentlich und 23 mal wegen Störungen. Diese waren in neun Fällen durch Bedienungsfehler verursacht, in sieben durch nicht korrektes Funktionieren der Sicherheitsorgane, in sieben weiteren durch Störungen in der Energieversorgung. Dabei handelte es sich bei zwei Fällen um Fehlmanöver ausserhalb der Reaktoranlage.

Seit Juni 1957 sind alle Kanäle des Reaktors mit Spaltstoffstäben beladen, nachdem die nötigen Aenderungen an den Einrichtungen zum Erkennen von Hülssenrissen angebracht worden waren. Bei einer normalen Betriebspause im Juli wurden jene Kanäle neu ausgebohrt, die sich in der Nähe des Kanals befinden, der die Störung vom 26. Oktober 1956 verursacht hatte, wodurch deren Wirksamkeit wieder normal wurde. Im Laufe des Herbst konnte ein absolut sicheres und einwandfreies Funktionieren der sehr komplizierten Einrichtungen für das automatische Laden und Entladen der Spaltstoffstäbe erreicht werden. Die visuelle Beobachtung der einzelnen Spaltstoffelemente durch das Periskop ist ausgezeichnet. Die Beseitigung radioaktiver Unreinigkeiten, die sich in der Entleerungskammer des Reaktors am Ende der Ausstossvorgänge vorfinden, vollzieht sich jeweils rasch und vollständig.

Die Energiegewinnungsanlage arbeitet seit mehreren Monaten mit Leistungen zwischen 1200 und 1400 kW. Die Lufttemperaturen am Eintritt in den Wärmeaustauscher sind noch ungenügend. Anfänglich erreichten sie nur etwa 140°C statt rd. 200°C . Versuche, die im Juni 1957 durchgeführt wurden, liessen erkennen, dass durch eine Aenderung des Profils der Spaltstoffhüllen wesentliche Verbesserungen erzielbar sind. Die Forschung geht in dieser Richtung weiter. Sie wird durch den Umstand begünstigt, dass die auf dem Versuchsstand erzielten Ergebnisse durch solche im Reaktor bestätigt werden können.

Vier Kanäle dienen normalerweise der Herstellung radioaktiver Präparate. Ausserdem sollten ein oder mehrere Stäbe aus Thorium für eine bestimmte Zeit durch solche aus Kobalt ersetzt werden, um die Strahlenwirkung auf Kobalt untersuchen zu können. Dabei ergibt sich eine entsprechende Absorption von Neutronen.

Die bisher beobachteten Deformationen des Graphitmoderators sind sehr gering. In nächster Zeit ist ein Heizversuch

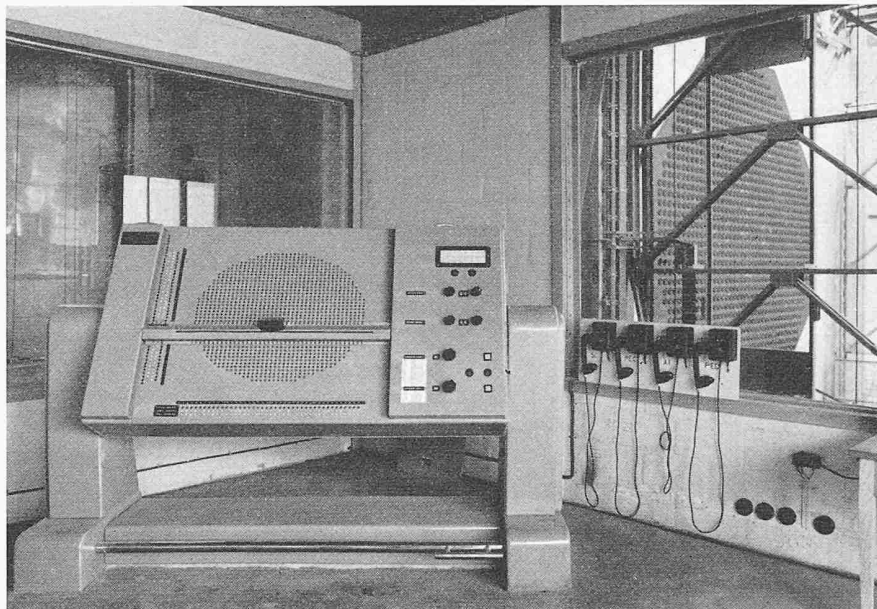


Bild 9. Bedienungspult für das automatische Ein- und Ausbauen der Uranstäbe; durchs Fenster sieht man die Seitenfront des Reaktors (Bild 6), an der die Spaltstoffstäbe eingeführt werden

in Aussicht genommen, der hierüber weiteren Aufschluss gibt.

5. Der Reaktor G_2

Der Reaktor G_2 verwendet ebenfalls natürliches Uran als Spaltstoff und Graphit als Moderator, jedoch als Kühlmittel CO_2 unter höherem Druck, das in geschlossenem Kreislauf umgewälzt wird. Er wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Stellen entworfen: Reaktor-Studienabteilung des Atomenergie-Kommissariates; Unterabteilung für nukleare Ausrüstung der Electricité de France, Studienabteilungen der Société Alsacienne de Constructions Mécaniques, der Société des Forges et Ateliers du Creusot, der Société Rateau und der Société Alsthom. Bilder 10 und 11 zeigen schematische Längs- und Querschnitte und Bild 13 das Schema des Kühlsystems und der Energiegewinnungsanlage.

Die Uranfüllung von 100 t besteht aus zylindrischen Elementen einer Legierung mit ganz geringem Aluminiumgehalt von 26 mm Durchmesser und 300 mm Länge, die von Hüllen aus Magnesium umschlossen sind. Die Hüllen tragen aussen Kühlrippen. Diese Elemente befinden sich in 1200 horizontalen Bohrungen von 70 mm Durchmesser im Graphitmoderator, der aus Graphitstäben von quadratischem Querschnitt mit 200 mm Seitenlänge aufgebaut ist. Er bildet einen prismatischen Körper mit horizontaler Axe und achteckigem Querschnitt, ist 8450 mm hoch; der Durchmesser des aktiven Kerns beträgt 7850 mm. Dieser ist von einem äusseren reflektierenden Teil umgeben, dessen Dicke sich je nach der Lage zwischen 0,6 und 1,0 m verändert. Der Neutronenfluss im Kern wird zu $2,5 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ angegeben.

Der Reaktor weist bei diesem Aufbau eine genügende Reserve auf, um trotz dem Temperatureinfluss und der allmählichen Anreicherung mit Spaltprodukten (Xenon-, Samariumbildung usw.) bei Vollast betrieben werden zu können und gleichzeitig zusätzlich Uran 233 aus Thorium oder leicht angereichertes Uran herzustellen oder den Neutronenfluss zu verringern oder eine Kombination dieser drei Möglichkeiten durchzuführen.

Zum Auswechseln der Spaltstoffelemente während des Betriebes dient eine Vorrichtung mit dichter beweglicher Schleuse. Die neuen oder regenerierten Elemente werden auf der Seite eingeführt, auf der das Kühlmedium austritt (in Bild 10 links). Dabei wird jedes einzelne Element automatisch in den entsprechenden Kanal im Moderator eingeschoben, wobei alle früher eingebrachten Elemente verschoben werden und auf der andern Seite ein gebrauchtes Element herausfällt. Die gebrauchten Elemente gelangen über unter 45° geneigte Gleitbahnen in eine Verzögerungsvorrichtung. Diese besteht im wesentlichen aus einem schraubenförmigen Kanal, der so ausgebildet ist, dass die Elemente mit mässiger Ge-

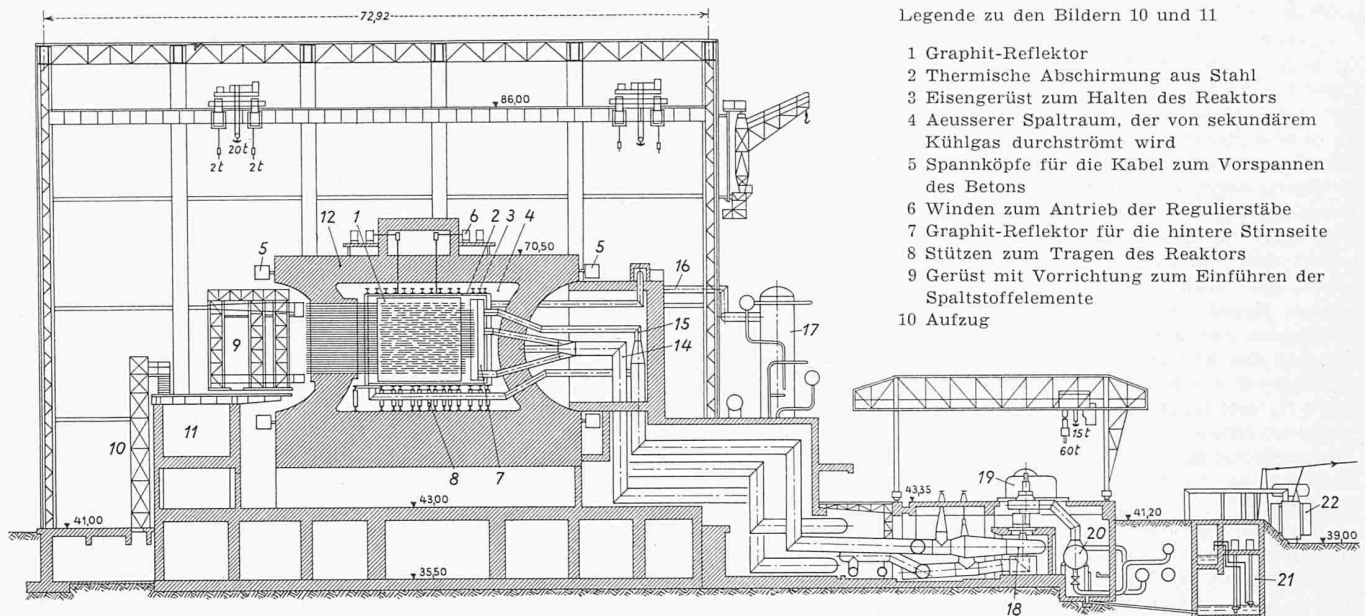


Bild 10. Schematischer Längsschnitt durch den Reaktor G_2 mit Energiegewinnungsanlage, 1:800

schwindigkeit unten austreten, und zwar gleichgültig, aus welcher Höhe sie herkommen.

Das Kühlmittel steht unter einem Druck von etwa 15 ata. Als Druckbehälter für den Reaktor dient die biologische Abschirmung. Dazu wurde sie als zylindrisches Gefäß mit nach innen gewölbten Böden in vorgespanntem Beton erstellt und ist innen mit Stahlblech ausgekleidet, um eine völlige Dichtigkeit sicherzustellen. Die Vorspannung wurde verhältnismässig niedrig gewählt, um den Vorteil auszunützen, den normaler Eisenbeton gewährt und der darin besteht, dass die Folgen einer Explosion durch die dabei entstehenden Gasverluste infolge Rissen begrenzt werden. Ein solcher Fall kann durch Materialermüdung infolge Temperaturschwankungen oder Strahlenwirkung eintreten.

6. Die Kühlvorrichtungen der Reaktoren G_2 und G_3

Bei normalem Betrieb sollen die Temperaturen im Kern der Uranelemente 550°C und an den Magnesiumumhüllungen 400°C nicht überschreiten. Ausserdem erfordert der doppelte Zweck, sowohl Plutonium als auch Energie zu erzeugen, einen kälteren Kühlmittelstrom in den Kanälen des mittleren Teils. Demzufolge sind zwei getrennte CO_2 -Gasströmungen mit verschiedenen hohen, regelbaren Eintrittstemperaturen angeordnet worden, und zwar eine für die inneren Kanäle mit 80°C und eine für die äusseren mit 150°C . Die entsprechenden Austrittstemperaturen betragen 305°C bzw. 354°C . Die Gasmengen werden zu 528 kg/s bzw. 469 kg/s am Eintritt, und zu 821 kg/s bzw. 176 kg/s am Austritt angegeben. Zur Förderung dieser Mengen dienen drei Haupt-

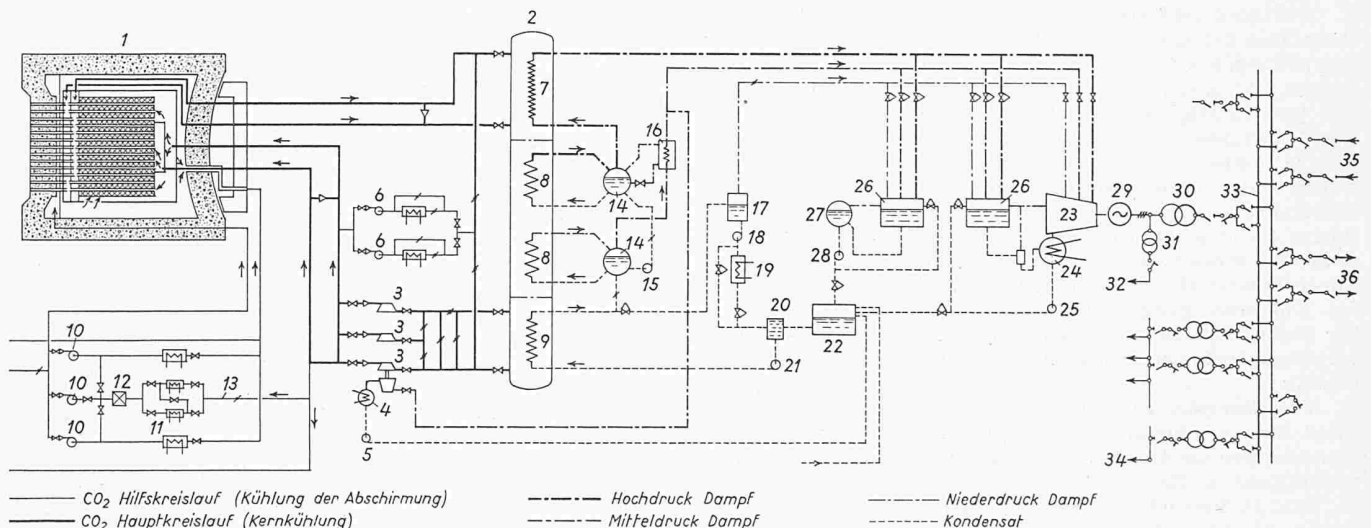


Bild 13. Prinzipschema des Kühlsystems und der Energiegewinnungsanlage des Reaktors G_2

- | | | | |
|---|--|------------------------------------|---|
| 1 Reaktor | 10 Gebläse mit Elektromotorantrieb für den sekundären CO_2 -Kreislauf | 19 Kühler | 30 Haupttransformator 10,5/60 kV, 45 MVA |
| 2 Wärmeaustauscher | 11 Gaskühler | 20 Mischgefäss | 31 Hilfstransformator 10,5/5,5 kV, 6 MVA |
| 3 Haupt-Gebläse mit Dampfmaschinenantrieb für den primären CO_2 -Kreislauf | 12 Filter | 21 Speisepumpe für Niederdruckteil | 32 Netz für Hilfsbetriebe der Energie-Gewinnungsanlage |
| 4 Kondensatoren zu 3 | 13 Ausgleichsleitung zwischen primärem und sekundärem Kreislauf | 22 Speisewasserbehälter | 33 Sammelschiene 60 kV |
| 5 Extraktionspumpe | 14 Ausdampftrommeln zu 8 | 23 Dampfturbine | 34 Netz für Hilfsbetriebe der Reaktoren G_2 und G_3 |
| 6 Hilfs-Gebläse mit Elektromotorantrieb für den primären CO_2 -Kreislauf | 15 Hochdruck-Speisepumpe | 24 Kondensator zu 23 | 35 Fremdenergie (Bagnols 1 und 2) |
| 7 Ueberhitzer | 16 Mitteldruck-Ueberhitzer | 25 Extraktionspumpe zu 24 | 35 Energieabgabe (Piolence und Ardoise) |
| 8 Verdampfteile | 17 Ausdampfgefäss zu 9 | 26 Ausdampfgefässe mit Enthitzung | |
| 9 Speisewasser-Vorwärmer | 18 Extraktionspumpe | 27 Hilfskondensator | |
| | | 28 Extraktionspumpe zu 27 | |
| | | 29 Drehstrom-Generator | |

- 11 Kammer zur Kontrolle der Spaltstoff-Hüllen auf Risse
- 12 Gleitbahnen für die gebrauchten Spaltstoffelemente
- 13 Vorrichtung zum Absenken der gebrauchten Elemente
- 14 CO₂-Leitung zur Kühlung des Reaktorkerns
- 15 CO₂-Leitung zur Kühlung der Abschirmung
- 16 CO₂-Leitung zu den Wärmeaustauschern
- 17 Wärmeaustauscher
- 18 CO₂-Gebläse
- 19 Dampfturbine zum Antrieb von 18
- 20 Kondensator zu 19
- 21 Pumpstation
- 22 Transformator

Bild 11 (rechts). Schematischer Querschnitt durch den Reaktor G₂. 1:800

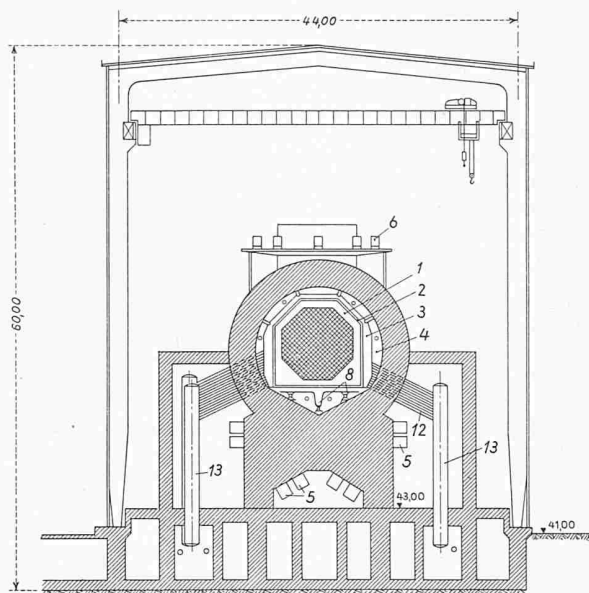
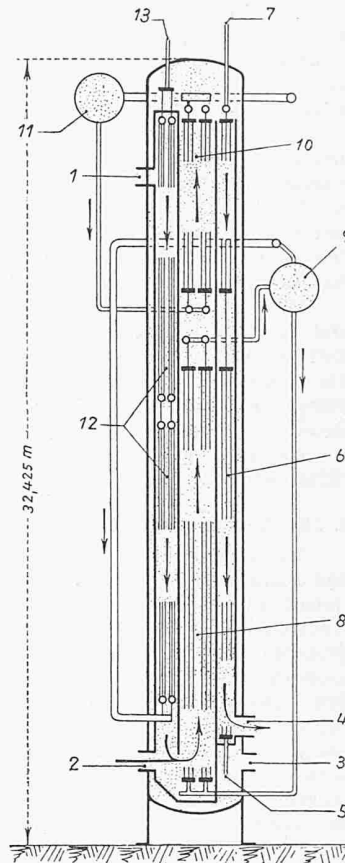


Bild 14 (rechts). Schematischer Vertikalschnitt durch einen Wärmeaustauscher der Energiegewinnungsanlage des Reaktors G₂

- | | | |
|--|---|--------------------------------|
| 1 Eintritt des CO ₂ -Gases mit 354° C | 4 Austritt des CO ₂ -Gases mit 71° C | 9 Hochdruck-Ausdampftrommel |
| 2 Eintritt des CO ₂ -Gases mit 305° C | 5 Speisewasser-Eintritt in den Vorwärmer | 10 Niederdruck-Verdampfer |
| 3 Austritt des CO ₂ -Gases mit 145° C | 6 Speisewasser-Vorwärmer | 11 Niederdruck-Ausdampftrommel |
| | 7 Speisewasser-Austritt aus 6 | 12 Ueberhitzer |
| | 8 Hochdruck-Verdampfer | 13 Ueberhitzer-Austritt |



Turbogebläse (eines davon ist Reserve), die über Zahnradgetriebe von Kondensations-Dampfturbinen angetrieben werden, deren Leistungen $2 \cdot 3850 + 2350$ kW betragen. Ausserdem stehen zwei, durch Elektromotoren angetriebene Hilfsgebläse zur Verfügung (eines davon ist wiederum Reserve).

Ausser der Kühlung des Reaktorkerns besteht ein zweiter CO₂-Kreislauf für die Kühlung der thermischen und biologischen Abschirmungen. Hier betragen die Eintrittstemperatur 25° C und die Austrittstemperatur 50° C. Aufgestellt sind zwei Gebläse (davon eines Reserve), die je 500 kg/s fördern und durch Elektromotoren von je 670 kW angetrieben werden. Dazu kommt noch ein Hilfsgebläse von 102 kW Antriebsleistung.

7. Die Energiegewinnungsanlage

Im Gegensatz zur Anlage des Reaktors G₁ wird hier der Dampf nicht durch Expansion von heissem Druckwasser erzeugt, sondern durch Verdampfung in Wärmeaustauschern. Im Interesse hoher Betriebssicherheit sind vier gleich gebaute parallel geschaltete Austauscher aufgestellt worden, von denen drei eine für Vollastbetrieb des Reaktors genügende CO₂-Gaskühlung ermöglichen. Sie wurden von der Société Française des Constructions Babcock & Wilcox geliefert. Bild 13 zeigt das Schema der Gesamtanlage, auf dem die Schaltung der Austauscher ersichtlich ist. Bild 14 gibt einen schematischen Vertikalschnitt durch einen Wärmeaustauscher.

Jeder Austauscher enthält einen Speisewasser-Vorwärmer, einen Mitteldruck- und einen Hochdruckverdampfer sowie einen Mitteldruck- und einen Hochdrucküberhitzer, Bild 14. Jeder dieser fünf Apparate besteht aus zwei parallelen Rohrbündeln. Der Mitteldruckdampf wird in einem ausserhalb liegenden Austauscher mit kondensierendem Hochdruckdampf überhitzt. Insgesamt werden bei voller Leistung 47,8 kg/s Hochdruckdampf von 10,7 ata, 334° C und 19,0 kg/s Mitteldruckdampf von 2,2 ata, 171° C erzeugt. Ausserdem expandieren 48,6 kg/s Speisewasser von 115° C in einem Ausdampfgefäss auf einen Druck von 0,5 ata, wodurch 3,2 kg/s Niederdruckdampf von 0,5 ata, 81° C (Sattdampf) entstehen, während das nicht verdampfte Wasser (45,4 kg/s) von einer Extraktionspumpe in den Speisewasserbehälter zurückgeführt wird.

Das heisse Kohlensäuregas aus der Randzone des Reaktors tritt mit 354° C. in jene Kammern des Austauschers ein, in denen sich die Ueberhitzer befinden, und durchziehen sie von oben nach unten, also im Gegenstrom zum Dampf. Unten mischen sie sich mit dem CO₂-Gas aus der Kernzone des Reaktors, das mit 305° C eintritt. Die gesamte Gasmenge umspült nun die Verdampfer-Elemente von unten nach oben und kühlt sich dabei auf 145° C ab. Ein Teil des Gases wird mit dieser Temperatur von einem Gebläse abgesogen und der Randzone des Reaktors zugeführt; der Rest strömt von oben nach unten durch die Kammer des Speisewasservorwärmers, um dort mit 71° C vom andern Gebläse in den Reaktorkern hineingefördert zu werden.

Der Dampfturbine strömen der gesamte Hochdruck- und der gesamte Niederdruckdampf sowie ein kleinerer Teil (nämlich 6,6 kg/s) des Mitteldruckdampfes zu, während der grössere Teil (12,4 kg/s) für Dampfturbinen bestimmt ist, die die CO₂-Gebläse antreiben. Beim gewählten Verfahren ist der höchste Dampfdruck (10,7 ata) wesentlich kleiner als der CO₂-Druck (15 ata). Dieser Druckunterschied wurde als notwendig erachtet, um auf alle Fälle ein Eindringen von Dampf in das CO₂-Netz zu vermeiden.

Im normalen Betrieb ist eine Abdampfmenge von 57,6 kg/s aus der Hauptturbine zu kondensieren. Die Kühlwassermenge beträgt 15 500 m³/h, der Kondensationsdruck 0,035 ata. Um den Reaktor auch bei abgestellter Turbinengruppe voll betreiben zu können, sind zwei Enthitzergefässe und ein Hilfskondensator aufgestellt worden. Die drei Dampfleitungen sind unter Vorschalten von automatisch betätigten Expansionsventilen in diese Gefässe eingeführt, in denen die Ueberhitzung durch Einspritzen von Kondensat vernichtet wird. Der Dampf (57,6 kg/s) kondensiert dann bei 0,5 ata im Hilfskondensator, wozu eine Kühlwassermenge von 6590 m³/h nötig ist.

Da der Hauptturbine zur Hauptsache überhitzter Dampf zugeführt wird, konnte sie in üblicher Bauart mit horizontaler Achse ausgeführt werden. Sie leistet bei 3000 U/min 40 MW an der Kupplung, während der direkt gekuppelte Generator für 45 MVA gebaut ist. Diese Leistung ist wesentlich grösser als die oben für den Reaktor angegebene (25 MW). Der Unterschied liegt darin begründet, dass die Reaktorleistung unter ungünstigen Annahmen berechnet worden ist; es erscheint sehr wohl möglich, dass eine Turbinenleistung von 35 MW

erreicht wird. Turbine und Generator sind wiederum von der Société Rateau bzw. von der Société Alsthom geliefert worden. Die Klemmenspannung von 10,5 kV wird in einem Transformator auf die Netzspannung von 60 kV der Electricité de France erhöht.

Ein System von Regeleinrichtungen wirkt auf die Dampfdrücke im Hoch- und Mitteldruckteil sowie auf die Speisewassertemperaturen am Ein- und Austritt des Vorwärmers. Sie halten die CO_2 -Gastemperaturen an den Austritten aus den Wärmeaustauschern innerhalb enger Grenzen konstant. Die Eintrittstemperaturen werden durch das Regelsystem des Reaktors unveränderlich gehalten.

Die Energiegewinnungsanlagen der beiden Reaktoren G_2 und G_3 , die Turbogebälse für die CO_2 -Gasumwälzung und ein Teil der Einrichtungen für die Lagerung und die Reinigung des CO_2 -Gases befinden sich im Freien. Die Kondensatoren liegen hier wesentlich tiefer als bei der Anlage für den Reaktor G_1 ; das Kühlwasser muss nur um 13,6 m gehoben werden, so dass sich hier eine Turbinenanlage zur Energierückgewinnung nicht lohnt.

8. Die Anlage zur Plutoniumgewinnung

Die gebrauchten Uranstäbe bestehen aus Uran 238, aus den Spaltprodukten des Urans U 235 und einem schwachen Gehalt an Plutonium U 239, das sich durch die Wirkung der Neutronen auf das Uran 238 gebildet hat. Die Trennung des Plutoniums und die Regeneration des Urans wird in einer besonderen Anlage nach einem Verfahren durchgeführt, das in den Laboratorien des «Commissariat à l'Energie Atomique» vor der Weltkonferenz für friedliche Ausnützung der Atomenergie vom Jahre 1955 in Genf ausgearbeitet wurde. Es gliedert sich in die folgenden sechs Operationen: Auflösung; Extraktion; Eindampfung; Konzentration, Reinigung und Umsetzung in metallischen Zustand.

a) *Die Auflösung.* Nach dem Verlassen des Reaktors werden die Uramelemente mechanisch von den Hüllen getrennt und in Körben aus rostfreiem Stahl während etwa vier Monaten gelagert, wobei die Radioaktivität der Spaltprodukte beträchtlich abklingt. Darauf taucht man die Körbe in ein Gefäss, das Salpetersäure enthält; diese löst die letzten Reste von Magnesium. Dann gelangen sie in ein weiteres Gefäss mit rauchender Salpetersäure, in der sich das Uran auflöst unter Bildung von Nitraten der Elemente Uran, Plutonium sowie der Spaltprodukte. Man analysiert die Lösung und passt ihren Säuregehalt sowie ihre Dichte den Erfordernissen der nachfolgenden Operationen an.

b) *Die Extraktion* vollzieht sich in Batterien von Misch- und Absetzgefässen, in denen sich die Lösung im Gegenstrom zur Extraktions-Flüssigkeit bewegt. Dabei bewirkt je ein Rührwerk den Uebergang von einem Absetzgefäss zum nächstfolgenden Mischgefäss. Bei der Entwicklung der Extraktionsverfahren stellte das Aufstellen der Sicherheitsmassnahmen gegen die starke radioaktive Strahlung der Lösung interessante Probleme. So sind die Antriebsmotoren der Rührwerke und der grösste Teil der Steuerapparate gegenüber den Lösungsbehältern durch eine Abschirmung aus dicken Bleiplatten geschützt. Auch die Regelung der Flüssigkeitsstände ist hinter diesem Schuttschild angeordnet.

c) *Eindampfung.* Die von Plutonium und Uran freie Lösung enthält noch die Spaltprodukte. Ihre Radioaktivität ist beträchtlich; sie liegt bei einigen Zehnerheiten Curie pro Liter, weshalb die Lösung gelagert werden muss. Um ihr Volumen zu verringern, wird sie durch Eindampfen etwa im Verhältnis 100:1 konzentriert.

d) *Die Behandlung des Plutoniums.* Die Plutoniumsalze aus der Extraktion werden in einer besonderen Halle durch Ausfällen mit Soda in Absetzgefässen ausgeschieden und anschliessend von neuem in Salpetersäure aufgelöst. Mit Rücksicht auf die geringen Mengen führt man die nachfolgenden Prozesse im Laboratoriumsmassstab durch. Eine letzte Reinigung der Plutoniumsalzlösung wird nach dem klassischen Verfahren der Extraktion aus dem Lösungsmittel, nachfolgender Reinigung mit Harz und oxalitischer Ausfällung vorgenommen. Schliesslich folgt die Umsetzung des gereinigten Plutoniumoxalates in Metallbarren.

e) *Die Rückgewinnung des Urans.* Der weitaus grösste Teil der gebrauchten Uranstäbe besteht aus Uran 238, das nach der Extraktion als Uranylнитrat anfällt. Dieses wird nun mit Oxalsäure ausgefällt und das so erhaltene Oxalat gewaschen, um die letzten Verunreinigungen auszuschleiden.

Nach dem Absetzen trocknet man das Uransalz in einem dampfgeheizten Rotationsofen und lagert es in Fässern.

9. Die Plutoniumgewinnungsanlage

Die Behandlung der Uranstäbe vollzieht sich in einem Gebäude von 170×37 m Grundfläche und 17 m Höhe, das mit einem über 30 m hohen Turm versehen ist, Bild 15. Die Apparate und Leitungen bestehen aus rostfreien Stählen, deren Zusammensetzung den jeweiligen Verhältnissen hinsichtlich Korrosion angepasst ist. Zum Schutz gegen β - und γ -Strahlen hat man die Operationen in Einzelprozessen aufgeteilt, die in getrennten Räumen vorgenommen werden. Die Wände dieser Räume bestehen aus Beton und sind bis 1,8 m dick. Schutzschirme aus Blei und Schikanen befinden sich an jenen Apparaten, die in der Nähe beaufsichtigt werden müssen.

Das ganze Rückgewinnungswerk ist in vier Abteilungen unterteilt, nämlich 1. die aktive Abteilung, in der sich die hauptsächlichsten Behandlungsapparaturen befinden und deren Zutritt verboten ist. 2. Die halbaktive Abteilung, die das Personal periodisch betreten darf, um die nötigen Arbeiten (Aufsicht, Apparateunterhalt, Entnahme von Proben) durchzuführen. 3. Die inaktive Abteilung, die die Bedienungsgänge der aktiven Abteilung und die Räume für die letzten Rückgewinnungsoperationen des nur noch leicht verunreinigten (strahlenden) Urans enthält. 4. Die Arbeitsabteilung, in der die letzten Reinigungsoperationen des Plutoniums und dessen Umwandlung in Metall in dichten Kästen vorgenommen werden. Diese vier Abteilungen werden unter verschiedenen Unterdrücken gehalten, derart, dass kein radioaktiver Staub von der ersten in die zweite und von dieser in die dritte usw. gelangen kann. Dazu dienen Ventilationseinrichtungen, die in den einzelnen Räumen bis zu acht Lüfterneuerungen pro Stunde erzeugen. Die Abluft wird vor derer Austritt ins Freie so weit als möglich filtriert. Die gesamte Fördermenge der Ventilatoren beträgt rd. 100 m³/s. Sämtliche Ventilationsabluft sowie die abgehenden Gase und Dämpfe werden am Ende eines 80 m hohen Kamins ins Freie abgegeben.

Die Gefährdung in der aktiven Abteilung der Anlage und die Notwendigkeit eines ununterbrochenen Betriebs haben dazu geführt, dass alle Apparate dreifach vorgesehen wurden, wobei jeder einzelne in eine vollständig geschlossene Zelle aus Beton eingebaut ist. Die eine Wand dieser Zellen besteht aus Barytziegeln. Im Falle einer Störung durchschlägt man diese Wand, und betritt die Zelle, nachdem sie von strahlenden Substanzen genügend gereinigt ist.

In der ganzen Umgegend werden laufend Kontrolluntersuchungen durchgeführt. Die an exponierten Stellen aufgestellten Prüfgeräte melden die Ergebnisse in den Kommandoraum, wo auch alle wichtigen Daten, wie Durchflussmengen, Flüssigkeitsstände, Temperaturen und Drücke an Instrumenten abgelesen werden können. Diese sind auf einer grossen Schaltwand übersichtlich angeordnet.

10. Nebenbetriebe

Ausser den allgemeinen Hilfsbetrieben, die bei jedem technischen Werk vorkommen, sind im Atomenergiezentrum in Marcoule eine Graphitwerkstätte und eine Behandlungsstation für die Abwässer eingerichtet worden. Die Graphitstücke des Moderators werden von der Werkstätte in Chedde der Compagnie Pétiney in der hier verlangten hohen Genauigkeit geliefert, wo nötig in der Graphitwerkstätte nachgearbeitet und dort gelagert. Da das Eindringen von Unreinigkeiten sowohl bei der Lagerung als auch bei der Bearbeitung strengstens vermieden werden muss, sind die Räume klimatisiert und mit einem besonderen System der Staubausscheidung ausgerüstet.

Der Baubeschluss für das Atomenergiezentrum ist 1952 gefasst worden; mit den Bauarbeiten konnte bereits im Mai 1954 begonnen werden. 15 Monate später war der Reaktor G_1 fertiggestellt. Der Reaktor G_2 soll im Sommer 1958 in Betrieb kommen, der Reaktor G_3 folgt ihm in einem Abstand von einem halben Jahr, während die Anlage für die Plutoniumgewinnung demnächst ihre Arbeit aufnehmen wird.

Die Gesamtanlage wird im Frühling 1959 voll betrieben werden können. Sie vermag alsdann jährlich 100 kg Plutonium und eine elektrische Leistung von mindestens 50 MW an das Netz der Electricité de France abzugeben. Die Belegschaft wird alsdann rd. 1000 Personen betragen, davon ein sehr grosser Teil Ingenieure und Techniker.