

Nukleare Hochtemperatur Technologie **Dr.-Ing. Urban Cleve** **Consultant**

Thorium Very High Temperatur Helium-Gas-Cooled Reactor. **TVHTGR**

Katastrophenfreies Hochtemperatur Kernkraftwerk
600 MWel/1.500 MWth bis 1.200 MWel/3.000 MWth
betrieben mit
Uranium, Thorium, Sonnenstrahlung.

Grundlage des Gesamtanlagenkonzeptes sind die Erfahrungen, die mit den HTR-KKW dem AVR in Jülich und dem THTR-300 in Schmehausen erarbeitet werden konnten. Beschrieben sind diese im Detail in folgenden Veröffentlichungen, auf die im nachfolgenden Text zur näheren Erläuterung Bezug genommen wird:

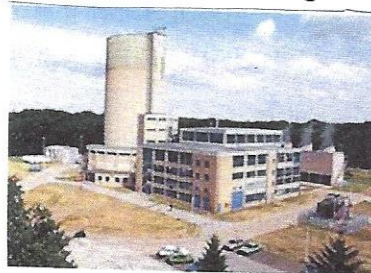


Fig. 1.
The AVR 46 MWth/15 MWel Experimental HTR
Power plant.

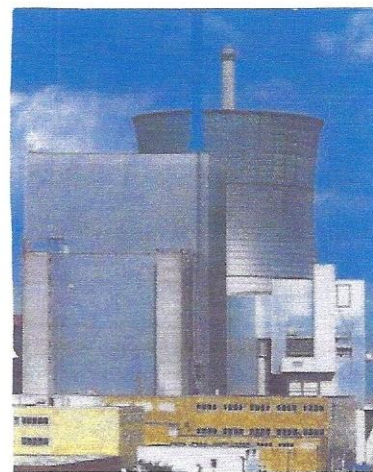
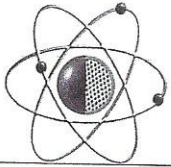


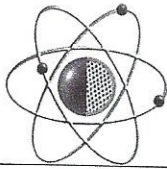
Fig. 7.
THTR-300 MWel/750MWth Demonstration
Power Station.

A. Fachliteratur zur Planung und Konstruktion.

- 1.) „Die Gesamtanlage des AVR“. H. Braun; U. Cleve; H. Knüfer; J. Oberklus; ATW Sonderdruck 5/1966;
- 2.) „Besonderheiten der bauliche Anlagen“. W. Beller mann; K. Nebgen; G. Wittchow; ATW 5/1966
- 3.) „Druckbehälter und tragende Einbauten“; W. Beller mann; H.G. Schwiers; ATW 5/1966;
- 4.) „Die Abschaltanlage“: W. Fricke; H. Gnutzmann; H. Handel; W. Muser; ATW 5/1966.



- 5.) Die Beschickungsanlage“. H. Bialuschewski; W. Fricke; G. Honecker; H. Landwehr; ATW 5/1966;
- 6.) „Mess- und Steuerungseinrichtungen der Beschickungsanlage“; J. Jacquemin; W. Pflüger; R. Steffens; E. Ziermann; ATW 5/1966;
- 7.) „Die Kühlgasgebläse“. U. Scholz; W. Volz; F.W. Wegener; ATW 5/1966,
- 8.) „Die Heliumgasreinigungsanlage“. R. Gilli; J. Schöning, L. Werner; W. Weinlein; ATW 5/1966;
- 9.) „Sicherheitsfragen und Sicherheitseinrichtungen“. U. Hennings; J. Wohler; B. Wolfram; ATW 5/1966;
- 10.) „Die Physik des AVR-Reaktors“. W. Drechsel; G. Ivens; A. Schatz; ATW 5/1066.
- 11.) „Inbetriebnahme und Funktionsprüfungen“. K.H. Bromkamp; U. Cleve; H.-J. Hantke; F. Schweiger; ATW 5/1966.
- 12.) „ Experimente mit Anlageteilen“; C.B. von der Decken; H.-J. Hantke; W. Rausch; ATW 5/1966:
- 13.) „AVR-20 Jahre Betrieb“; Ein deutscher Beitrag zu einer zukunftsweisenden Energietechnik. VDI Berichte 729:
- 14.) „The Technology of High Temperature Reactors“. U. Cleve; K. Kugeler; K. Knizia; ICAPP-Congress Nice 2011;
- 15.) „Ausgewählte Themen aus dem Betrieb des THTR-300“. R. Bäumer; VGB-Kraftwerkstechnik 2./Febr. 1989:
- 16.) „The Technology of TVHTR-Nuclear Power Stations with Pebble Fuel Elements,“ ATW special print 2018. U. Cleve:
- 17.) „Konstruktionsprinzipien zur nuklearen und betrieblichen Sicherheit vom HTR-KKW“.ATW special print 2020. U. Cleve;
- 18.) „Co-Generation of Electricity and desalinated Seawater by Uranium, Thorium and Solar High Temperature Energy“. U. Cleve; DME/IAEA Seminar Essen 2018.
- 19.) „Large Scale Co-Generation of Electricity and Hydrogen by Uranium, Thorium and Solar High Temperature Energy,“ U. Cleve. „International Journal of Energy and Power Engineering Research 13 (2019)“.
- 20.) „Auslegung und Konstruktion großer Dampfturbinen“. U. Cleve: Technischen Mitteilungen des HDT Heft 1 1964;
- 21.) „Automatisierung in Wärmekraftwerken“, U. Cleve; BBC-Nachrichten 12/1963;
- 22.) „Bauelemente für kombinierte Abwärmeverwertung und Prozessdampfzeugung“. U. Cleve; CAV Chemieanlagen+Verfahren; Heft 7+8/ 1974.
- 23.) „Tschernobyl hätte nicht sein müssen“. K.P. Krause; Eike 2020;



- 24.) „Widerlegung der Kritiken einer Expertengruppe am AVR“ . U. Cleve
- 26.) Protokoll der BMFT-Sitzung über HTR-KKW beim KIT am 21.12.2011;
- 27.) „Breeding of fissile Uranium using Thorium with Pebble Fuel Elements.“
U. Cleve; EIR-Conference-Report; May 2013;
- 28.) „Thorium Brennstoff aus der Erde für tausende von Jahren“. U. Cleve
- 29.) Bundeskanzlerin Dr. Merkel: „Wovon wollen wir leben ? Thorium als Energiequelle !“ Diskussion im Internet.
- 30.) „Gibt es den katastrophensfreien Reaktor?“ K. Kugeler; Physikalische Blätter 37/2001;
- 31.) „Design of Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM.“ Z.Zhang, Z.Wu, Y. Sun, Fu Li, HTR Meeting, Beijing, China 2004.
- 32.) „The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant; An Engineering and Technological Innovation.“ Z.Zhang et al. „Engineering 2“ (2016);
- 33.) Drawing: Primary System of HTR-PM;
- 34.) „Hochdruck- Speisewasservorwärmer für Kraftwerke mit spaltfrei eingeschweißten Rohren.“ U.Cleve, H.Manhart: VGB Kraftwerkstechnik, Heft 1 1975; VGB Konferenz „Kraftwerk und Umwelt“.

A. Auslegungsdaten einer 600 MWe/1.500 MWth Dampfturbogruppe.

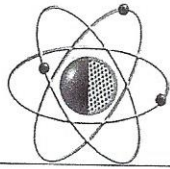
1.) Thermodynamischer Wasser-Dampf-Kreislauf;

- 1.1 Die Wasserdampferzeugung erfolgt in einem/mehreren mit Sekundärhelium beheizten, außerhalb des Primär-Helium-Gas- Kreislauf und des Reaktors im Sekundärteil liegenden He/sec//-Wasser-Dampferzeugers mit Zwischenüberhitzung. //Lit.:16/Abb.28+29://

Dieses Konzept hat zudem den sicherheitstechnischen Vorteil, dass kein Wasser oder Dampf in den Reaktor eingetragen werden kann. So kann auch kein Tritium in den Sekundärteil übertragen werden.

Auslegungsdaten:

- Helium Temperatur Eintritt WT 850 grd C.
- Helium Temperatur Austritt WT 220 grd C.
- Dampfleistung 1.800 to/h;



- Frischdampfzustand 220 bar/530 grd C;
- Zwischenüberhitzung 30 bar/ 530 grd C.
- Speisewassereintritt 240 grd C;

1.2. Dampfturbogruppe.

Leistung 600 MWe, Frischdampf: 220 bar/530/530 grd.C; mit doppelflutigen HD-Teil, MD-Teil, zwei doppelflutigen ND-Teilen bis Kondensatordruck; //Lit.: 20+16, Abb.:33// 7-8 Dampfentnahmen aus der Turbine zur Vorwärmung des Dampfkesselspeisewassers und zur Dampfentnahme für sekundäre Anlagen, wie Wasserentsalzung, Wasserstofferzeugung, Heizwärme für Wohnungen, Dampf/Wärme für Industrieanlagen. // Lit.: 22. //

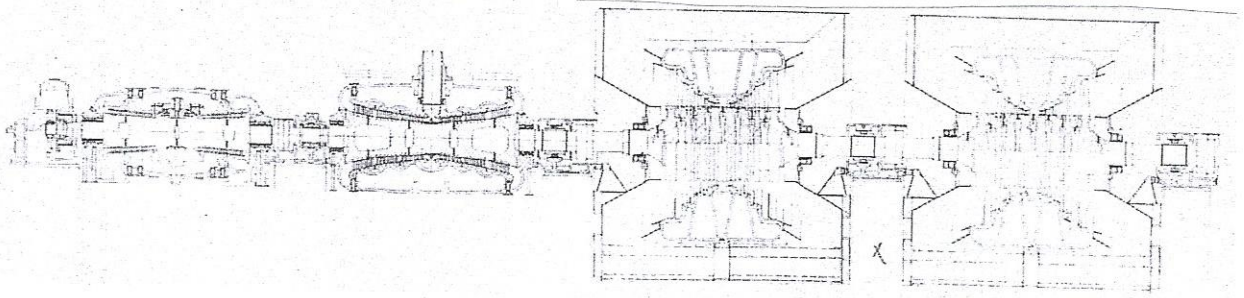


Bild 9: 600-MW-Einwellenturbine. Auslegungsdaten: 166 ata, 530/530°C, 19°C, 7 Anzapfungen

1.3. Solaranlage.

Die erzeugte Wärme wird in den Wasser/Dampfkreislauf eingespeist und verringert damit den Wärmebedarf des Reaktorteils und ermöglicht so einen geringeren Uran/Thorium Verbrauch. // Lit.:16: Abb. 34+35; //



Fig. 34.
Solar plant.

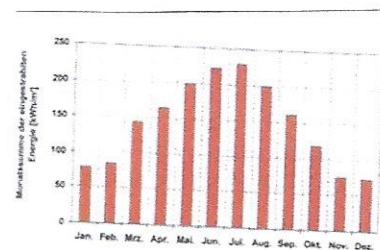
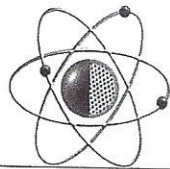


Fig. 35.
Average solar energy in Tunis City, 1997.

C. Sicherheitsanforderungen.

In einer vom BMFT am 21.12.2011 // 26; // angesetzten Besprechung in Karlsruhe beim KIT über Sicherheitsanforderungen für (V)HTR-KKW nahmen teil:



Die Herren Professoren Dr. Pitterich, Dr. Ehrlich, Dr. Stieglitz, Dr. Cheng und Dr. Tromm aus Karlsruhe, Herr Prof. Dr. Kurt Kugeler, Mitglied in der Akademie der Wissenschaften in NRW und ehemals der RSK und Dr.-Ing. Urban Cleve. Herr Professoren Dr. Hurtado, TU Dresden und Herr Küppers, Leiter des Öko-Instituts Darmstadt hatten ihre Teilnahme abgesagt.

Herr Prof. Dr. Kugeler trug erweiterte Grundsätze zur zukünftigen maximalen Sicherheit von Kernkraftwerken vor und stellte hierzu zusätzlich zu den derzeitigen Sicherheitsvorschriften für LWR-KKW folgende erweiterte Forderungen auf:

- Berstsicherer Primärgaseinschluß auch bei Terrorangriffen;
- Selbsttätige Nachwärmeabfuhr; // 16.: Abb.:20//
- Coreauslegung unempfindlich gegen Reaktivitätsstörungen;
- Core unempfindlich gegen Wasser, Dampf- und Lufteinbruch;
- „zero-Emissionskonzept auch bei Störungen;

Es bestand Übereinstimmung in der Beurteilung, dass nur HTR- Kernkraftwerke mit einem **Spannbetondruckbehälter** //16.: Abb.: 9; 10; 21; 24; 26;// und mit **kugelförmigen Brennelementen mit spaltgasundurchlässigem Triso – Coating der Brennstoffpartikel** Uran und Thorium //16.: Abb.: 13;14;15;// diese extremen Sicherheitsanforderungen erfüllen können.

Das vorliegende Konzept eines TVHTR-KKW ist das einzige KKW-Konzept, das alle diese extrem hohen Sicherheitsanforderungen als katastrophenfreies KKW erfüllt.

//14;16;17;18;19;//

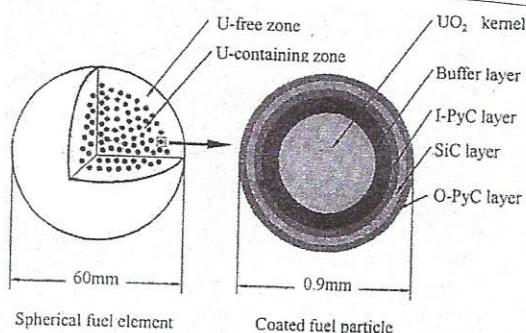


Figure 2. TRISO-Fuel Elements and coated particles.

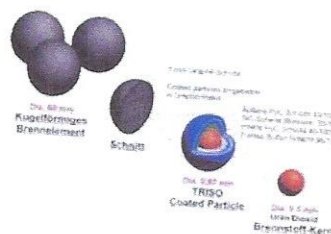


Fig. 13.
Composition of a TRISO-pebble.

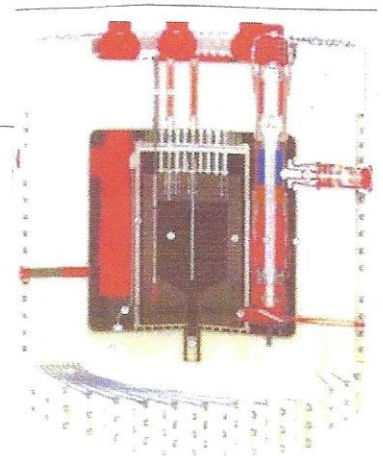
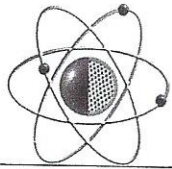


Fig. 9.
Pre-stressed concrete pressure vessel and
THRT-300 core.



D.Dimensionierung und Konstruktion des Kugelbettes.

Die Hauptkriterien zur Auslegung des Kugelbettes /Cores sind:

- Gleichmäßiges fließen der Brennelemente über die Breite des Kugelbettes; //12; 14;; Fig. 27; 25; //24// //und damit gleichmäßige Durchströmung mit Heliumkühlgas;
- Abschalt- und Regelstäbe in der Grafit-Reflektor-Wand;
- Bei Ausfall der Kühlung möglichst geringe Temperaturerhöhung der Brennelemente durch Nachwärmeproduktion. //16; Fig.: 20; 25; //
- Die maximale Brennelementtemperatur von 1.600 grd. C. bleibt auch bei Kühlmittelverlust unterschritten

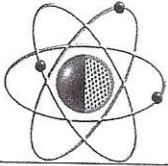
Bei der Planung des Cores des THTR-300 wurde erkannt, dass dieses Core zu „mächtig“ war, das heißt einen zu großen Durchmesser und ein zu hohes Kugelbett hatte, mit der Folge, dass das Bett bei Außerbetriebnahme nicht „kaltgefahren“ werden konnte, so dass die Aktivität nicht vollständig abgebrochen wurde. Weiter wurde erkannt, dass im Falle eines Kühlmittelverlustes die Nachwärmeproduktion einen erheblich höheren Temperaturanstieg gegenüber den AVR zur Folge hatte. Daher musste die max. Primärgas- Betriebstemperatur auf 750 grd C begrenzt werden. //10; //

Gelöst wurde dieses Problem durch Einfahren der Abschaltstäbe in das Kugelbett. //16; Fig.: 19 //. Dies stellte sich im späteren Betrieb als gravierende Fehlkonstruktion heraus. Der Kugelbruch war erheblich höher als beim AVR. //14; 16; //

Als Alternative wurde eine Ringbett-Konstruktion // 16; Fig.: 10// als Lösung besprochen. Da noch keine Erfahrungen mit dem Verhalten der Grafitkonstruktion des AVR vorlag, konnte dieses Konzept noch nicht als realisierbar angesehen werden. Dennoch wurde es als zukünftige mögliche Konstruktion in 1965 zum Patent angemeldet, das auch erteilt worden ist.

Auf der Grundlage der hervorragenden Betriebsergebnisse mit dem AVR kann dessen Kugelbett-Dimensionierung als Idealgröße betrachtet werden.

Die Ringcore-Konstruktion ist im Prinzip eine kreisförmige Nebenreihung der AVR-Core-Abmessungen.



Die Größe des Kugelbettes wird bestimmt durch die Leistungsdichte der Brennstoffe, der Differenz zwischen äußerem und inneren Bettdurchmesser als Grundfläche und der Höhe des Kugelbettes. // 14; 16; 17; //

Nach innen und außen wird das Kugelbett begrenzt durch Grafitreflektoren. In diesen werde die Abschalt- und Regelstäbe ähnlich wie beim AVR eingebaut. //4; //

Entscheidend wichtig zum Erreichen eines gleichmäßigen Kugelflusses und damit gleichmäßiger Durchströmung des Bettes mit Heliumkühlgas ist die Konstruktion der Wand des Kugelbettes. Die Wandkonstruktion des AVR hat sich gegenüber einer neuen Konstruktion im THTR-300 als entscheidend besser erwiesen. // 12; Fig.: 1; 3; 4; 16; Fig.: 22//. Ebenso zeigte die im AVR angewendete „up“ Strömung durch das Kugelbett erhebliche betriebliche Vorteile gegenüber der „down“-Durchströmung beim THTR-300.

Der Umlauf der Kugelelemente erfolgt über etwa 10 auf dem Umfang verteilte Brennelement-Abzugsvorrichtungen. In //5.Fig.:1// ist das Schema der Beschickungsanlage des AVR dargestellt. Dieses Konzept kann mit wenigen Modifikationen und Vereinfachungen übernommen werden. Die Erfahrungen mit dieser Anlage waren exzellent. In 2.400.000 Kugelumwälzungen und 23 Betriebsjahren sind nur 220 Kugeln zerstört worden und wurden aus dem Kreislauf ausgeschleußt. Dies entspricht einer Bruchrate von 0,0092 %, ein exzellenter Wert, insbesondere für eine Erstkonstruktion. Daher sind Änderungen an den einzelnen Bauelementen und dem Kreislaufkonzept nicht erforderlich.

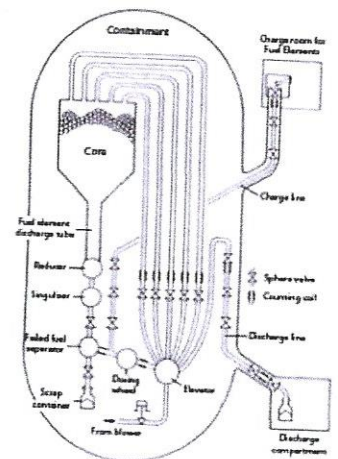
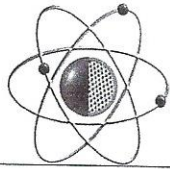


Fig. 6.
Fuel cycle of pebble bed transportation system.

D. Konstruktion des Ringcores eines großen TVHTR.

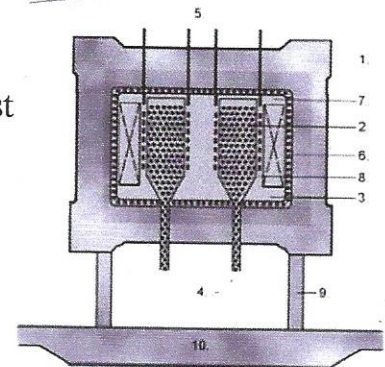
Das Volumen des für die vorgesehen Wärmeleistung erforderliche Kugelbettes wird bestimmt aus der Wärmedichte des Brennstoffs Uran und Thorium, dem Abstand zwischen innerem und äußeren Durchmesser als Grundfläche und der Höhe.



Bei einer 1.500 MWth – Anlage ist der innere Bettdurchmesser so groß, dass die Hepr/Hesec-Wärmetauscher innerhalb des Kugelbettes aufgestellt werden können. // 14; 16; Fig.: 10 //

Dies ergibt nennenswerte Vorteile bei der Konstruktion der Grafitbauten und der internen Gasführung. Ebenso ist eine Vereinfachung der Durchdringungen der Spannbetondruckbehälterdecke zum Ein- und Ausbau der Wärmetauscher durch vereinfachte Führung der Spannkabel in der Decke des Spannbetondruckbehälters, möglich // 16; Fig.:22//

Die Konstruktion der Anlage mit innenliegenden He/He- Wärmetauschern hat den Vorteil, dass ein Eindringen von Wasserdampf in den Primärkreislauf mit möglicher Änderung der Reaktivität //25; 29// unmöglich ist. Diese Konstruktion hat damit eine entscheidend höhere Sicherheit.



1. Prestressed concrete pressure vessel
2. Ring Pebble Bed Reactor Core
3. Grafit Structure
4. Fuel Chamber
5. Regulation and shut down rods
6. Liner with insulation and Water Cooling System
7. HE/HE Heat Exchanger Inlet
8. HE/HE Heat Exchanger Outlet
9. Concrete Support for prestressed pressure Vessel and Biological Shield
10. Concrete Foundation

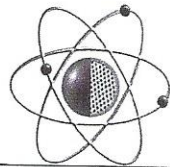
Fig. 10.
Concept of pebble bed ring core.

Im übrigen kann die innere Konstruktion des Kugelbettes ähnlich gebaut werden, wie in // 2; Abb.: 1+2 und 3; Abb.: 1; // beschrieben. Die hier gemachten positiven Betriebserfahrungen werden damit zu 100% genutzt. Das gleiche gilt für Reaktorphysik. // 10; //

Ebenso können die Erfahrungen des AVR und des THTR-300 mit der Konstruktion der Grafit- und Kohlsteineinbauten und dem thermischen Schild vollständig übernommen werden. //16; Fig.: 23//

Die große Zahl der Kugelabzugsvorrichtungen hat nennenswerte betriebliche Vorteile, die die höheren Kosten aufwiegen. Diese sind:

- sehr gleichmäßiger Kugelfluss;
- sehr gleichmäßige Durchströmung des Kugelbettes mit Heliumkühlgas;
- gleichmäßige Kühlung aller Kugelelemente;
- hohe Kühlgastemperatur ermöglicht den Bau eines VHTR mit Temperaturen von über 1.000 grd. C;
- bestmögliche Rückführung der Kugel in geeignete Zonen;
- kurze Durchflusszeiten der Brennelemente;
- Ermöglichung eines hohen Abbrandes der Brennelemente durch mehrfache Rückführung;
- Niedrige Nachwärmeproduktion;
- Schnellentleerung des Kugelbettes im Notfall;



E. Planung und Konstruktion der Gesamtanlage und der wesentlichen Komponenten.

Der THTR-300 ist in zahlreichen Abbildungen veröffentlicht. //16; Abb.: 7 ; 8: 14; Fig.: 9// Dieses Grundkonzept ist aus betrieblicher Sicht sehr gut gelungen und kann als Grundkonzept für alle weiteren THTR-KKW übernommen werden. Kernstück der Anlage ist der Spannbetondruckbehälter //16. Fig.: 8, // An diesem Konzept wird das zentrale Kugelbett durch die vorbeschriebene Ringbettkonstruktion ersetzt. An Berechnung und Konstruktion und den herausragenden Sicherheitsvorteilen eines Spannbetondruckbehälters ändert sich nichts. Alle Berechnungsprogramme sind vorhanden, die Konstruktion ist bekannt und erprobt. Die herausragenden Sicherheitsvorteile dieser Konstruktion sind in // 16; Fig.: 21 – 26; // detailliert beschrieben.

Nuclear Power Plant
Hamm-Uentrop THTR 300

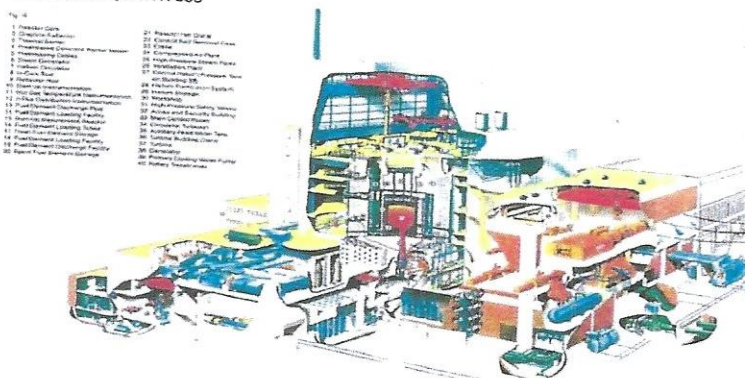


Fig. 8.
Survey of the THTR-300.

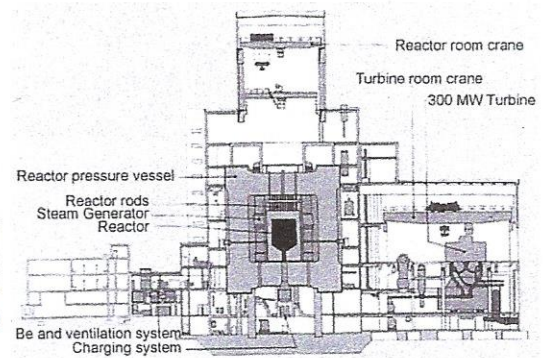
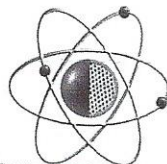


Figure 9. The THTR-300 MWel Demonstration Power Station in Schmehausen, Germany.

Planung, Konstruktion und Bau aller Nebenanlagen ist aus den Betriebserfahrungen mit dem AVR und dem THTR-300 bekannt. Das in jedem Einzelfalle als besser erprobte Bauteil wird übernommen.

Das wichtigste Bauelement sind die Kugelelemente mit Triso-Coating aller Brennstoffpartikel. Dadurch wird das Heliumkühlgas nur sehr gering mit Spaltprodukten belastet. Lagerung und Transport frischer Elemente vor Einbringung in das Kugelbett ist sicher und einfach zu handhaben, da diese strahlungsfrei sind. Dies ist ein hoher betrieblicher Vorteil. Diese Elemente sind



entwickelt und im THTR-300 und im AVR über 23 Betriebsjahre erfolgreich erprobt. //16; Fig.: 13; //

Beschickungsanlage:

Die Bauelemente des AVR werden übernommen, einschließlich der Meß-, Regel- und Steuerungsanlage zur Brennelementumwälzung: Basis AVR und THTR-300; //5; 6; 14; Fig.: 6; 7; 16; Fig.: 5; 6; 13; 14; //

Wandkonstruktion des Kugelbettes: AVR: // 16; Fig.: 4//

Abschaltanlage: Regelstäbe des AVR und THTR-300; Abschaltstäbe: des AVR; //4; 16; Fig.: 31; //

Kühlgasgebläse: Die Kühlgasgebläse werden wie beim THTR-300 in die Wand des Spannbetondruckbehälters horizontal eingebaut. Konstruktionsprinzip AVR und THTR-300; //7; 14; Fig.: 5; 16; Fig.: 30//

Heliumgasreinigungsanlage und Heliumlager: AVR und THTR-300; //8; //

Brennelementlager für abgezogene Kugelelemente: AVR und THTR-300; //16; Fig.: 15; //

Belüftungsanlage für alle Bereiche der Reaktoranlage: THTR-300;

Zusätzlich Informationen über Konstruktion und Betrieb sind in //15// und //16// bis ins Detail beschrieben.

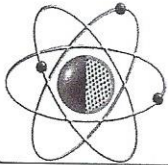
Die in „Konstruktionsprinzipien zur nuklearen und betrieblichen Sicherheit“ beschriebenen Maßnahmen sind erfüllt. //17; //

Damit ist das von Prof. Dr. Kurt Kugeler, ex-Mitglied der RSK, geforderte Ziel eines katastrophenf freien Kernkraftwerks erreicht. //30, //

F. Einsatzbereiche für Hochtemperatur Kernkraftwerke.

Hochtemperaturkernkraftwerke haben besondere Einsatzmöglichkeiten und Vorteile gegenüber anderen KKW-Techniken bei:

- Nutzung von Thorium als Brutstoff zur Erzeugung von spaltbarem Uran; // 27; 28; 29; //



- Einsatz von Sonnenwärme zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs von Uran und Thorium;
- CO₂ freie Stromerzeugung; Ein HTR kann die Dampfkesselanlage bei Kohlekraftwerken ersetzen bei Weiterbetrieb des Sekundärteils;
- Wegen der katastrophenfreien Technik Errichtung in Nähe der Stromverbraucher; // 29; //
- Dadurch entfallen/verkürzen sich teure Stromtransportleitungen mit hohen Stromverlusten;
- Co- Produktion von Elektrizität und Hochtemperaturwärme zur Erzeugung von Trinkwasser aus Meerwasser; // 18; //
- Co- Produktion von Elektrizität und Hochtemperaturwärme zur Erzeugung von Wasserstoff; // 19; //
- Vergasung von Braunkohle; daher weitere Nutzung der Braunkohle zur Erzeugung von Gas, auch als Ergänzung/Alternative zu Nord Stream 2 - Gas aus Rußland;
- Einsatz in vielen Industriebereichen insbesondere in der Verfahrenstechnik zur Erzeugung von Strom und Hoch-/Niedertemperaturwärme für Thermische Prozesse, Heizungsanlagen und Warmwasserversorgung; // 22; //
- Einsatz in Stadtnähe zur Erzeugung von Strom und Wärme für Fernheizungsanlagen;
- Erzeugung von Trink- und Gebrauchswasser für die Landwirtschaft an der deutsch-polnischen Ostseeküste mit Gewinnung seltener Erden.

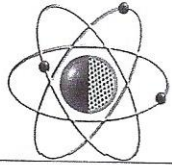
G. Der TVHTR-600el/1.500MWth und der HTR-PM 200 MWel im Vergleich.

Das China HTR-PM 200 MWel Kraftwerk ist detailliert beschrieben in Lit.: // 31, // „Engineering (2-2016)“: Zuoyi Zhang et al. und // 32 //:

„The Shandong Shidao Bay 200 MWe-High-Temperature Gas-Cooled Pebble Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant.“

„An Engineering and Technological Innovation.“

Zur Historie ist zu sagen, dass zunächst ein kleiner 10 MWth Versuchsreaktor gebaut worden ist, berechnet mit den am AVR erarbeiteten Berechnungsprogrammen und mit diesem wurde im Jahre 2010 ein erfolgreichen



GAU-Test, dieser allerdings ohne sekundärem Stromerzeugungsteil, durch geführt, wie im Jahre 1967 zuvor erstmals am AVR-KKW demonstriert.

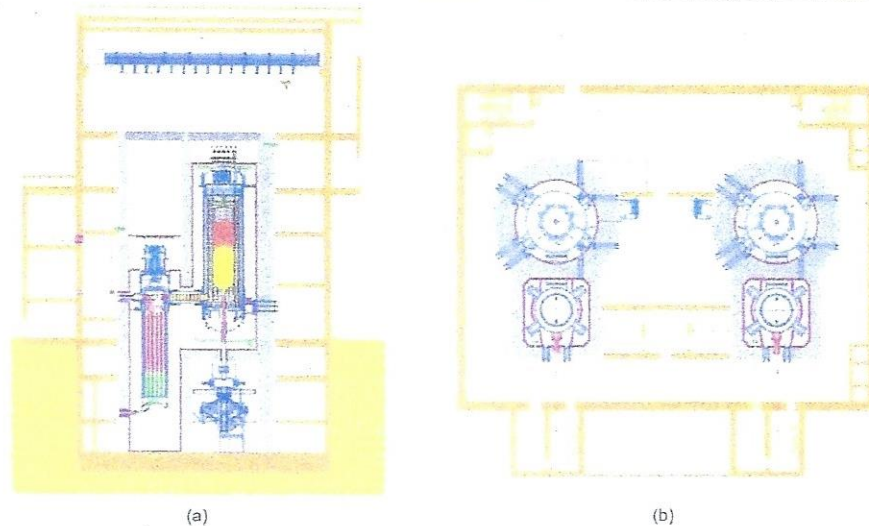


Fig. 2. The HTR-PM demonstration nuclear power plant. (a) Front view; (b) top view.

Das HTR-PM Konzept wurde von Siemens-Interatom entworfen und ist beschrieben in //Lit:13.// Daher ist Siemens der Entwickler und de facto Eigentümer dieses Konzeptes. Siemens hat aber entschieden, dieses Konzept nicht weiter zu verfolgen, da technisch zu unsicher und wirtschaftlich zu teuer.

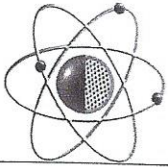
Nachfolgend soll dies untersucht werden.

Wesentlich ist die Frage, ob die von Prof. Dr. K. Kugeler erstellten Sicherheitsanforderungen an zukünftige KKW:

- Berstsicherer Primärgaseinschluß auch bei Terrorangriffen;
- Selbstständige Wärmeabfuhr;
- Coreauslegung unempfindlich gegen Reaktivitätsstörungen;
- Core unempfindlich gegen Wasser-, Dampf- und Lufteinbruch;
- „zero“-Emissionskonzept auch bei Störungen;

eingehalten werden können.

- Ein berstsicherer Primärgaseinschluß ist nur mit einem Spannbeton-druckbehälter zu erreichen.



- Die selbstständige Wärmeabfuhr ist möglich, ebenso eine Coreauslegung unempfindlich gegen Reaktivitätsstörungen.
- Das Core ist empfindlich gegen Wasser-, Dampf- und Luftenbruch, da die Dampferzeuger innerhalb des Primärgaskreislaufes eingebaut sind, und die Verbindung beider Behälter durch einen „hot-gas-duct“ unsicher ist.

Das „zero“ Emissionskonzept bei Störungen kann mit einem HTR-PM demnach nicht erreicht werden.

Im Einzelnen sind folgende Konstruktionen hinsichtlich ihrer Sicherheit zu beurteilen:

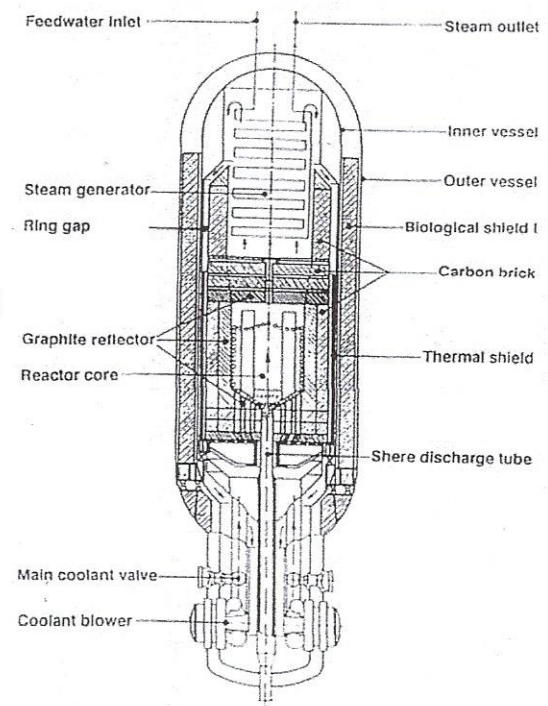
1.) Die Brennelemente.

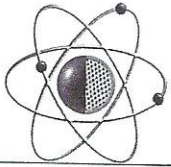
Die Brennelemente sind der entscheidend wichtigste Teil eines jeden Kernkraftwerks. Die Entwicklung der Coated Particles mit dreifacher Spaltgas- undurchlässiger Beschichtung sind die alles entscheidend wichtigste Entwicklung für die Hochtemperaturreaktortechnik.

So wurde der AVR mit zwei ineinanderstehenden Druckbehältern konstruiert und auch gebaut, um die Sicherheit zu garantieren, daß das Primärgas, anfänglich mit einer Aktivität von 10 hoch 7 Curie berechnet, nicht in die Umgebung gelangen kann. Mit dieser Entwicklung wurde später eine geringe Aktivität von 360 Curie im AVR gemessen, ein Verbesserungs-/Aktivitätsminderungsfaktor von 0,000036.

Diese Elemente sind bislang im Betrieb nur im AVR über 23 Betriebsjahre und im THTR-300 mit kurzer Betriebszeit eingesetzt worden. Parallel dazu wurden sie im Versuchsbetrieb weiter im AVR und dem Versuchszentrum der EU in NL Petten weiter untersucht und verbessert.

Die während des Betriebes des AVR und des THTR-300 gemessenen Aktivitäten des gesamten Primärgas innerhalb der Druckbehälter zeigen, daß selbst eine Totalentlastung des Primärgases, wie in Tschernobyl erfolgt, nicht zu einer





extremen Belastung der Umgebung führt, so daß eine Evakuierung nicht erforderlich ist.

Wären in Tschernobyl diese Elemente eingesetzt gewesen, hätte wahrscheinlich niemand etwas von diesem schweren Reaktorunfall gemerkt.//Lit.:23//

Aus Sicherheitsgründen ist es als sicher anzunehmen, dass ohne diese tolle Entwicklung die Hochtemperaturreaktortechnik sich als unrealisierbar erwiesen hätte.

Diese überwiegend in Deutschland eingesetzten Elemente sollen im auch HTR-PM, eingesetzt werden. China hat also diese Entwicklung vollständig übernommen, und selbstverständlich auch im neu konzipierten TVHTR. (Lit.: 1; 5;12;14;16;24;27;30;)

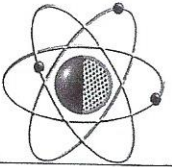
Unumtritten ist es, daß diese Brennelemente die besten und sichersten Brennelemente aller bekannten Kernkraftwerkskonstruktionen sind.

2.) Die Konstruktion der Druckbehälter.

Die Druckbehälter sind neben den Brennelementen der nächste Bauteil von höchster sicherheitstechnischer Bedeutung für alle Kernkraftwerke.

Für den THTR-300 wurde wegen der Größe des Reaktorcores, da Stahldruckbehälter für die hier erforderliche Reaktordimensionen nicht mehr gefertigt werden können, ein Spannbetondruckbehälter entwickelt. //Lit.: 14; 16; 17;/. Experimente, Berechnung und Konstruktion zeigen, daß **ein Spannbetondruckbehälter im Gegensatz zu Stahldruckbehältern nicht bersten kann.**

Aus diesen Gründen wird ein TVHTR grundsätzlich mit einem Spannbetondruckbehälter gebaut. Eine Begründung, weshalb China diese herausragende Entwicklung nicht nutzt, ist nicht bekannt.



Wegen des großen Bauvolumens von Core mit Dampferzeuger hat China zwei Druckbehälter vorgesehen, einen für das Core, den zweiten zur Aufnahme der Dampferzeuger. Beide Druckbehälter sind durch einen „hot gas duct“ (HGD) miteinander verbunden. Damit wurde das aus Sicherheitsgründen grundlegende Konstruktionsprinzip, Core und Dampf/Wärmeerzeuger in einem geschlossenen Heliumkreislauf liegend, verlassen.

Mit diesem Konzept ist eine berstsichere Konstruktion nicht zu erreichen.

Der hot-gas-duct /HGD/ wurde in Deutschland als Komponente im thermisch hoch beanspruchten Wärmetauscherbau entwickelt. Kritisch war die Ausdehnung durch Temperatur, eine feste Einspannung zwischen zwei Fixpunkten führte häufig zum Bruch. Dieser HGD, in der Konstruktion //Lit.31 Fig.:2 und Lit.32; Fig.1;// zu ersehen und ist im Außenrohr zwischen den beiden schweren Druckbehältern ohne Dehnungsmöglichkeit eingespannt. Das Rohr und die Schweißnähte werden bei Erwärmung beider Behälter bei Erwärmung auf Druck, bei Abkühlung auf Zug beansprucht. Weiter dehnen sich beide Behälter bei Erwärmung unterschiedlich in senkrechter Richtung aus. Dabei tritt eine Biegebeanspruchung auf den HGD auf. Diese Wechsel-Druck-Zug-Biegebeanspruchungen sind als sehr kritisch zu beurteilen. Im Bruchfall ist eine Totalentladung des gesamten Primärgasvolumnes in die Umgebung nicht zu vermeiden.

Wegen der sehr hohen Belastung der Schweißnähte wurde in Deutschland die „spaltfrei Schweißnahttechnik“ //

Lit.: 34// entwickelt. Aus den vorliegenden Zeichnungen ist nicht zu erkennen, ob diese Schweißtechnik beim HTR-PM Anwendung findet. Das Innenrohr des HGD wird zur Aufnahme der Druck-Zug Beanspruchung mit einem Kompensator konstruiert, einem im deutschen Kraftwerksbau als extrem kritischem Bauelement bekannt.

Bei einer Undichtigkeit treffen Heiß- und Kaltgas aufeinander, ein extrem kritischer Vorgang. Die Folge dürfte ein dauerhafter Totalausfall der gesamten Anlage sein.

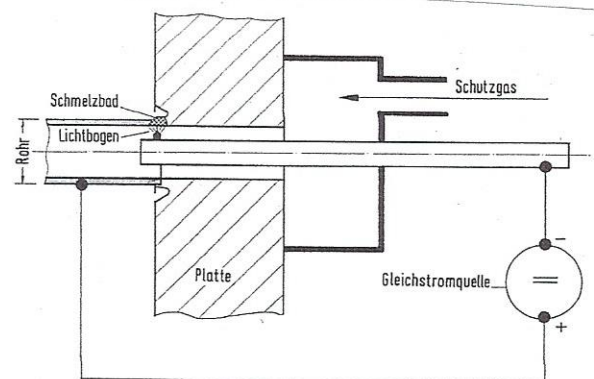
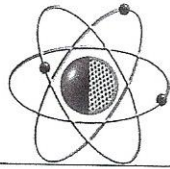


Bild 2. Prinzip des spaltfreien Rohreinschweißens im WIG-Verfahren.



3. Konstruktion des Kugelbettes des HTR-PM.

Zur Konstruktion des Kugelbettes gelten die gleichen Überlegungen wie beim TVHTGR. Das Core soll nicht zu mächtig sein, also Durchmesser und Höhe des Bettes ergeben das Corevolumen, das multipliziert mit der spezifischen Wärmeleistung die Reaktorleistung bestimmt. Wesentlich ist das Erreichen eines gleichmäßigen Durchflusses der Brennelemente zwischen Wand und Zentrum, Dieser wird ermöglicht durch eine geeignete Wandkonstruktion und einer niedrigen Betthöhe.

Die Dimensionierung des Kugelbettes ist in engen Grenzen durch die Abmessungen des Stahldruckbehälters vorbestimmt. Da der Bettdurchmesser begrenzt ist, kann eine größere Leistung nur mit der Höhe des Kugelbettes ermöglicht werden. Die Höhe des Kugelbettes des HTR-PM beträgt 11m. Das Kugelbett wird damit sehr „mächtig“.

Ein TVHTGR beträgt die Höhe des Kugelbettes nur 3m bis 5m, diese ermöglicht eine kurze Durchlaufzeiten der Brennelemente, damit deren häufige Umwälzung mit dem Ziel, einen möglichst hohen Abbrand zu erreichen.

Folge des zu „mächtigen Kugelbettes“ ist, daß der HTR-PM nur mit einer maximalen Primärgastemperatur von 750 grd C betrieben werden kann. Die Abmessungen des AVR-Cores bilden die Basis der Ringcorekonstruktion, diese ermöglichen, wie am AVR erprobt eine Primärgas Temperatur von über 1.000 grd C. Begrenzt wird diese durch die Rohrwandtemperatur der Wärmetauscher/Dampferzeuger. Hier liegt aus wirtschaftlicher Sicht noch ein Entwicklungspotential im Materialbereich.

Ein weiterer Nachteil eines „Mächtigen Kugelbett-Cores“ liegt darin, daß die „Mächtigkeit“ auch die Höhe der Nachwärmeproduktion bestimmt. Fig.8 zeigt, daß die Temperatur der Brennelemente bei Ausfall der Kühlung bis auf 1.600 grd C. ansteigt, Die Temperatur, bei der Spaltgas aus dem Brennstoff austritt liegt bei 1.630 grd.C.

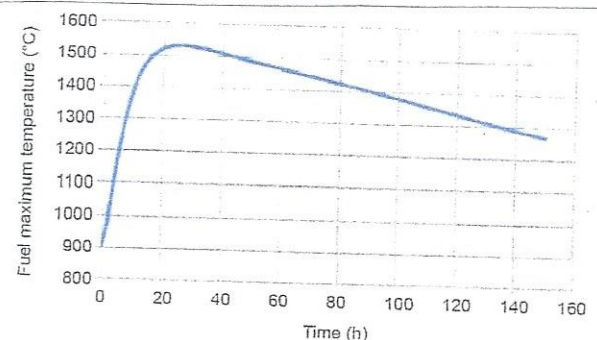
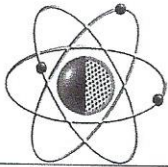
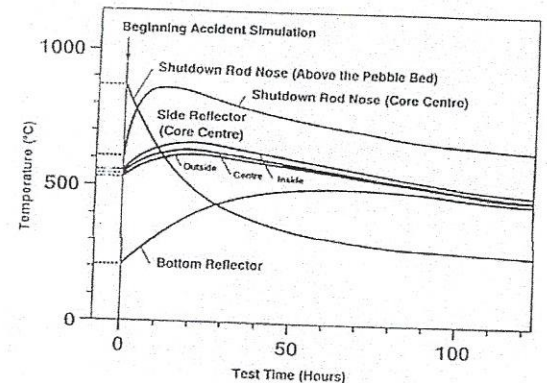


Fig. 5. The fuel peaking temperature of the HTR-PM during a loss-of-coolant depressurized accident.



Den Temperaturverlauf im Core des AVR beim den AVR Experimenten mit Verlust der Kühlung durch das Heliumgas zeigt Abb.8. Die Brennelementtemperatur liegt etwa 150-200 grd C. über der Heliumgas-Temperatur, so daß bei den AVR-Experimenten Nur eine max. Brennelementtemperatur von etwa 1.200 grd. C. erreicht wurde, .Damit ist der Sicherheitsabstand zu einer zulässigen Brennelementtemperatur von 1.630 grd C. sehr hoch.



4.) Wirtschaftlichkeitsüberlegungen

Bei einem Wirtschaftlichkeitsvergleich ist vor allem die Anzahl der Druckbehälter zu betrachten. Das Modulprinzip besteht aus einer Nebeneinanderstellung mehrerer HTR-PM KKW, die eine Dampfturbogruppe beaufschlagen.

Ein TVHTGR-Kraftwerk wird in allen gewünschten Leistungsgrößen mit einem zentralen Spannbetondruckbehälter gebaut.

Die Modulkonstruktion erfordert //Lit.31 Fig. 6,// bei einer Leistung von 600 MWe zwölf und bei einer Leistung von 1.200 MWe vierundzwanzig schweren Stahldruckbehälter. //Lit.: 31; Fig.6,//.

Bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Kraftwerksbau wurde immer festgestellt, daß eine nennenswerte Reduzierung der Investitionskosten sich nur durch Übergang zu größerer Leistung, also „Gesamtkosten/Installierte KW Leistung“, also den spez. Anlagekosten“ erreichen läßt, nie durch Nebeneinanderreihung gleicher Leistungsgrößen. Damit hat der HTR-PM durch die große Anzahl schwerer Druckbehälter einen erheblichen Nachteil gegenüber der Konstruktion mit einem Spannbetondruckbehälter

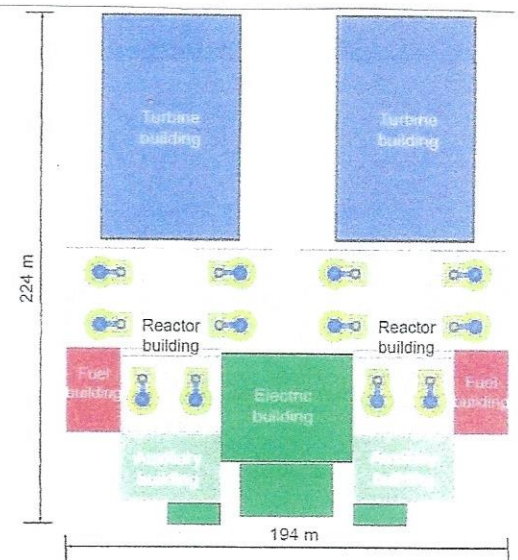


Fig. 6. The 2 x 600 MW_e HTR-PM multi-modules plant.