



**The Technology of High-Temperature-Reactors
Design, Commissioning, and Operational Results of AVR-15-MW_e Experimental Reactor Jülich, Germany and THTR-300-MW_e Demonstration Reactor Schmehausen, Germany and Their Impact on Future Designs**

Dr.- Ing. Urban Cleve

HohenfriedbergerStr 4 D-44141 Dortmund, Germany Tel: +49-231-432321, Fax: +49-231-432321, Email: uicleve@t-online.de

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. Klaus Knizia Blumenweg 17 D-58313 Herdecke Tel: +49-2330-974947, Fax:+49-2330-974949, Email: klaus.knizia@gmx.net

Prof. Dr.-Ing. Kurt Kugeler Nordstr.25 D-52428 Jülich Tel: +49-2461-7889, Fax: +49-2461-6214831, Email: k.kugeler@fz-juelich.de

Abstract – This paper recalls the main design features of new large HTR-Power-Plants and shows that all goals of Professor Schulten’s initial ideas were realized. Today, European and in particular German industry has had very good experience, knowledge and technology foundations for the design and safe nuclear operation of large HTR power plants up to the highest of capacities. Electrical power with very high thermodynamic efficiency can be produced as well as high temperature gases for operation of chemical processes; e.g. to synthesize hydrocarbon fuel from abundant feedstocks such as coal, biomass or recycled CO₂.

| | |
|--|---|
| <p>1. The Basic Design Features of Pebble Bed Reactors in Germany</p> | <p>Übersetzung von J. Michels mit Korrekturen durch den Autor Dr. U. Cleve</p> |
| <p>The German development of HTR-Reactors was mainly initiated by Prof. Dr. Rudolf Schulten’s ideas. He started this technology early in the 1950’s and 1960’s while employed by Brown Boveri, in co-operation with Krupp by “BBC/Krupp Reaktorbau GmbH”.</p> <p>Main Basis of his ideas and main design features are:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spherical graphite fuel elements, called pebbles, which contain the fission material. • Graphite as main construction material for the core. • A safe integrated reactor concept with helium as cooling gas. <p>The first experimental reactor was the AVR-46-MW_{th}-Experimental reactor Jülich, Germany, Fig. 1, Jülich,</p> | <p>Die deutsche Entwicklung der HT- Reaktoren wurden hauptsächlich durch Prof Dr. Rudolf Schultens Ideen eingeleitet. Er begann diese Technologie früh in den fünfziger /sechziger Jahren, als er bei Brown Boveri beschäftigt war, in der Zusammenarbeit mit Krupp in der „BBC/Krupp Reaktorbau GmbH“. Hauptbasis seiner Ideen und die wichtigsten Eigenschaften sind :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kugelförmige Graphitbrennelemente, (engl. „Pebble“), die das Spaltmaterial enthalten. • Graphit als Hauptbaumaterial für den Kernbehälter. • sicheres integriertes Reaktorkonzept mit Helium als Kühlgas. <p>Der erste experimentelle Reaktor war der AVR-46-MW_{th}-Experimental Reaktor in Jülich, Deutschland</p> |

As early as in 1966 the basic design of the THTR-300, Germany. Fig.9, was initiated as demonstration reactor.

Figure 1. The AVR-46 MWth Experimental Power Station.

The goal at all the time and still today is the construction of an inherently safe nuclear power station with outstanding safety. The basic nuclear physical design should not permit an uncontrolled intensification of the nuclear fission process. No graphite dust is allowed, to leave the integrated inner reactor system uncontrolled.

Schon 1966 wurde das grundlegende Design des THTR-300, Deutschland. als Demonstrationsreaktor geschaffen.

Immer und noch heute ist das Ziel der Bau eines in sich selbst sicheren Atomkraftwerks mit herausragender Sicherheit. Das grundlegende nuklear-physische Design darf keine unkontrollierte Intensivierung des Kernspaltungsprozesses erlauben. Kein Graphitstaub darf das integrierte innere Reaktorsystem unkontrolliert verlassen.

2. The Pebbles as Fuel Elements

The most important components of a nuclear power station are the fuel elements. They contain the fissile material for generating the energy. The more robust the fuel elements are, the safer the nuclear power plant. The main material of the pebble fuel element is graphite. The spherical pebbles have a diameter of 6 cm while the diameter of the inner fuel is 5 cm.

Embedded in the graphite matrix are approximately 15,000 coated particles (CP) in one pebble. The CP's were developed over a long period of time with international cooperation from companies in the United States, Great Britain, The Netherlands, Australia, France, and Germany. They have a diameter of 0.9 mm. The fuel kernel is gastight and is encapsulated by three layers of hard and pressure-resistant PyC-SiC-PyC, the so called "TRISO Elements", Fig. 2.

Figure 2. TRISO-Fuel Elements and coated particles.

The TRISO Elements avoid fission and decay products (radioactive waste) which are the sources of dangerous radioactivity. The coating prevents the fission materials from hazardous substances and keeps them safely contained. In addition the coatings do not deteriorate, even under high pressure and they do not corrode. In every kind of final storage, gamma radiation is generally insignificant in long term. It decays very quickly. The basic concept of a fuel element of the HTR reactor is to eliminate risk and minimize sources of dangerous material through multiple layers of containment. The output of the power plant depends on the number of pebbles. The pebbles form a "pebble bed", in the core, and they are loaded from above and withdrawn from below. The reactor is thus operated by means of continuous charging with fuel elements. The continuous operation of a pebble bed reactor makes it possible to achieve a very high utilization of the fuel elements, uses the fissile material very efficiently, and allows continuous

2. Die Kugeln als Brennelemente (BE)

Die wichtigsten Komponenten eines Atomkraftwerks sind die Brennelemente. Sie enthalten das Spaltmaterial für die Erzeugung der Energie. Je robuster die Brennelemente sind, desto sicherer das Atomkraftwerk. Das Hauptmaterial des Kugel-BE ist Graphit. Die kugelförmigen BE haben einen Durchmesser von 6 cm, während der Durchmesser des Brennstoffs im Inneren 5 cm ist.

In der inneren Graphitmatrix sind ungefähr 15.000 beschichtete Partikel (coated particles - CP) in einer Kugel eingebettet. Die CPs wurden über eine lange Zeitspanne in internationaler Zusammenarbeit von Firmen in den Vereinigten Staaten, in Großbritannien, den Niederlanden, Australien, Frankreich und Deutschland entwickelt.

Sie haben einen Durchmesser von 0,9 Millimeter. Der Brennstoffkern ist gasdicht umschlossen und durch drei Schichten von hartem und Druckbeständigem PyC-SiC-PyC, eingekapselt die so genannten „TRISO-Elemente“

Die TRISO-Elemente vermeiden den Austritt von Spalt- und Folgeprodukte (radioaktiven Abfall) die die Quellen der gefährlichen Radioaktivität sind. Die Beschichtung schützt die Spaltmaterialien vor Gefahrstoffen und hält sie sicher eingekapselt. Ausserdem halten die Beschichtungen sogar hohen Druck aus und korrodieren nicht. Bei allen Endlagern ist die Gammastrahlung auf lange Sicht unbedeutend, denn sie fällt sehr schnell ab.

Das Grundkonzept eines BE im HTR ist es, das Risiko zu beseitigen und Quellen des gefährlichen Materials durch mehrfache Schichten herabzusetzen.

Die Ausgangsleistung des Kraftwerks hängt von der Anzahl Kugeln ab. Die Kugeln bilden ein „Kugelbett“, im Kernbehälter. Sie werden von oben zugeführt und unten abgezogen.

Der Reaktor wird folglich ununterbrochen mit BE beladen. Der durchlaufende Betrieb eines Kugelbettreaktors macht es möglich, die BE sehr weit auszunutzen. Das Spaltmaterial wird daher sehr effizient genutzt und erlaubt Dauerbetrieb für einen langen Zeitraum, ohne dass man eine Unterbrechung für das Nachladen benötigt.

operation for a long period of time without shutting down for fuel element changing. The pebbles have proved in long time operation as excellent fuel elements. They have many advantages in comparison with other designs. Continuous operation over 8760 hours/ year is possible for several years.

Figure 3. Section through the AVR primary circuit.

No shut down for exchange of fuel elements is necessary.

Modern HTR TRISO fuel particles have been shown to retain fission products during normal operation and under accident conditions.¹

The quality level of the German fuel produced in the 1980s set a world-wide standard, which was later followed by other countries active in HTR fuel development.²

Die Kugeln haben sich im Langzeit-Betrieb als ausgezeichnete Brennelemente bewährt. Sie haben viele Vorteile im Vergleich zu anderen BE-Designs. Dauerbetrieb über 8760 Stunden Jahr ist für einige Jahre hindurch möglich.

Kein Herunterfahren zum Austausch von BE ist notwendig. Die modernen Triso - Brennstoffpartikel des HTR haben gezeigt, dass die Spaltprodukte während des Normalbetriebs und bei Unfall-Bedingungen nicht austreten können..

Die Qualität des deutschen Brennstoffs, der in den achtziger Jahren produziert wurde, setzte einen weltweiten Standard, dem später von anderen Ländern gefolgt wurde, die in der HTR-Brennstoffentwicklung tätig sind

3. Operational Results of the AVR

The design of the AVR started in the early 1960s and attained its first criticality on August 28, 1966. First electric power was produced on December 18, 1966. A cross-section of the AVR reactor is shown in Fig. 3.

The inner graphite core structure of the AVR is shown in Fig. 4.

The core diameter is 3 m and is surrounded by the graphite reflector, the thermal shield, the inner pressure vessel, the first bio shield and the outer pressure vessel. The main components are the steam generator, the cooling gas blowers, Fig. 5, the shutdown rods, the fuel feed system shown in Fig. 6 extraction system of the pebbles-, and the fuel cycle, Fig.7 and the helium gas cleaning circuit.

Figure 4. Section through the AVR primary circuit.

Figure 5. Gas cooling blowers.

The AVR was in operation for more than 22 years. The main operational results are:

- The simulation of a loss-of-coolant accident. The blowers were stopped, the shutdown rods were blocked, and the electrical supply was placed out of operation. This was the simulation of a worst case scenario. First experiment was done in 1967. Gas temperature was 850°C with a power output of 46 MW_{th}. This can cause the most severe type accident for a nuclear power station as occurred in Chernobyl. The core and graphite temperatures had been measured and the experiment showed that in the case of a loss-of-coolant accident, decay heat can be removed from the core without forced cooling and without causing unacceptably high temperatures in the surrounding components. The second tests in 1976 supplied extensive data material for the testing of computer program simulations. Cooling gas temperature was 950°C. These experiments demonstrated that the reactor was “inherently safe”. Fig.8.

- A similar test was done and proved with the HTR-10 in China, with the same success.

3. Betriebsergebnisse des AVR

Das Design des AVR begann in den frühen 60er-Jahren. Er erreichte seine erste Kritikalität am 28. August 1966. Erster elektrischer Strom wurde am 18. Dezember 1966 produziert.

Der Core-Durchmesser ist 3 m und wird durch den Graphitreflektor, das thermische Schild, den inneren Druckbehälter, das erste Bioschild und den äußeren Druckbehälter umgeben. Die Hauptkomponenten sind der Dampferzeuger, die Kühlgas- Ventilatoren, die Abschaltstäbe, der BE-Zulauf, das Kugel-Abzugssystem und der Brennstoffkreislauf, sowie die Helium-Gas-Reinigungsanlage.

Der AVR war für über 22 Jahre in Betrieb. Die Hauptbetriebsergebnisse sind:

- Die Simulation eines Kühlmittel-Verlust-Unfalles Die Gebläse wurden gestoppt, die Abschaltungsstäbe blockiert und die Stromversorgung wurde ausgeschaltet. Dieses war die Simulation eines Szenarios für den schlimmsten Störfall. (GAU)

Ein erstes Experiment war im Jahre 1967 erfolgt. Die Gastemperatur betrug 850°C mit einer Leistungsabgabe von 46 MW_{th}.

Diese Abschaltung kann die schwerste Art Unfall für ein Atomkraftwerk verursachen, wie geschehen in Tschernobyl. Die Kern- und Graphittemperaturen wurden gemessen. Das Experiment zeigte, dass bei einem Kühlmittel-Verlust Ausfall, Nachzerfallswärme vom Kern abgeführt werden kann ohne Zwangskühlung und ohne unzulässig hohe Temperaturen in den umgebenden Komponenten zu verursachen.

Die zweite Testserie 1976 liefert umfangreiches Datenmaterial als Berechnungsfaktoren zu Computersimulationen. Kühlgastemperatur war 950°C. Diese Experimente zeigten, dass der Reaktor „in sich selbst sicher“ ist.

- Ein ähnlicher Test wurde mit dem HTR – 10 in China an der Tsing Hua Universität durchgeführt und die Sicherheit ebenfalls nachgewiesen Ein Film hierüber ist unter www.biokernsprit.org abzurufen.

- Eine Störung geschah am Dampferzeuger. Er

Figure 6. The fuel extraction system. the reactor was “inherently safe”. Fig.8.

Figure 7. Basic diagram of the fuel cycle.

- One major incident happened with the steam generator. The steam generator was designed with four separate circuits, to provide the ability to shut down one circuit in case of leakage. In this situation, high pressure hot water or steam leaked into the helium gas. This only occurred on time. The problem was identified in a short time and the reactor was shut down. The control concept for water ingress accidents worked well. This was the only serious incident which occurred in all the years of operation. The reactor was out of operation for many months and after repair the steam generator worked without problems and at its full capacity

Figure 8. Loss-of-Coolant Accident Test results.

of 15 MWel.

- All other components worked safely and were tested under normal conditions in the laboratory. Primary and final testing was performed under helium conditions in the reactor. All these tests indicated a lot of problems and difficulties that could only be solved after quite expensive and extensive testing. However, a lot of experience in the field of helium technology was gained. During operation, all components could be repaired by use of special, newly designed devices to help to protect operational personnel from radioactivity. These devices worked very well and many repairs could be performed during operation of the reactor.

war mit vier Kreisläufen konstruiert, um die Möglichkeit zur Verfügung zu haben, bei Ausfall (Leckage) eines davon, diesen separat abzudichten, während die anderen weiter betrieben werden können

In dieser Situation gelangte Hochdruck-Dampf in das Heliumgas. Dieser Fall wurde rechtzeitig erkannt. Das Problem wurde in kurzen Zeit identifiziert und der Reaktor wurde kaltgefahren. Das Bedienkonzept für Wasser-Dampf-eintritt-Unfälle funktionierte gut.

Dieses war die einzige schwere Störung, die in allen Jahren des Betriebes auftrat. Der Reaktor lag für viele Monate still und danach arbeitete der Dampferzeuger ohne Probleme und mit seiner vollen Kapazität.

. Alle weiteren Komponenten arbeiteten sicher und wurden zuvor unter Normalbedingungen im Labor geprüft. Primäre und abschließende Prüfungen wurden unter Helium-Bedingungen im Reaktor selbst durchgeführt. Alle diese Tests zeigten viele Probleme und Schwierigkeiten, die nur nach ziemlich teureren und umfangreichen Tests behoben werden konnten. Dabei wurde viel Erfahrung auf dem Gebiet der Heliumtechnologie gesammelt. Während des Betriebs konnten alle Komponenten mittels spezieller, eigens hierzu konstruierter Geräte repariert werden. Das geschah auch, um das Betriebspersonal vor Radioaktivität zu schützen. Diese Geräte arbeiteten sehr gut und konnten, daher konnten viele Reparaturen während des Reaktorbetriebs durchgeführt werden.

- The radioactivity of the helium gas in the primary circuit was as low as 360 Curie.
- The fuel feed and discharge system showed excellent availability. 2,400,000 fuel elements were transported during the time of operation. Only 220 fuel elements were destroyed resulting in only 0.0092% of the handled elements being ruptured.
- During the operation in 22 years no accidents with radioactivity exposure occurred with personnel nor with the environment.
- The AVR was an excellent test reactor for a variety of different fuel elements with different kinds and compositions of U and Th. A complete survey of all fuel element types, inserted and tested in the AVR is given in /5,10/.
- The operational time of the AVR in spite of experiments, was 66.4%. The highest availability was 92% in 1976, an outstanding result for a very new design. AVR was shut down for political reasons on December 31, 1988. All current and planned tests with fuel elements were stopped, which was a very poor decision for future development of HTR-reactors.

. Die Radioaktivität des Heliumgases im Primärkreis betrug nur 360 Curie.

. Die BE-Zuführungs und Umwälzsysteme zeigten ausgezeichnete Verfügbarkeit. 2.400.000 BE wurden während der Betriebszeit transportiert. Nur 220 davon wurden zerbrochen. Das sind nur 0,0092 Prozent der transportierten Elemente.

Während des Betriebs traten in 22 Jahren keine Unfälle mit Radioaktivitätsbelastung für Personal noch für die Umwelt auf.

•Der AVR war ein ausgezeichneter Testreaktor für eine Vielzahl von verschiedenen Brennelementen mit verschiedenen Arten und Mischungen von Uran und Thorium. Eine Gesamtaufstellung aller eingesetzten und geprüften Brennstoffelementtypen, ist beigefügt

•Die Betriebszeit des AVR Jülich betrug trotz der Experimente 66,4%. Die höchste Verfügbarkeit war 92% im Jahre 1976, ein hervorragendes Ergebnis für ein ganz neue Konstruktion. AVR wurde aus politischen Gründen am 31. Dezember 1988 geschlossen. Alle laufenden und geplanten Tests mit BE wurden angehalten. Dies war eine sehr falsche Entscheidung für die zukünftige Entwicklung der HT-Reaktortechnik.

4. The THTR-300 in Hamm-Uentrop / Schmehausen

The basic design of the THTR-300e1 demonstration reactor was started in 1965, Fig. 9. When the decision was made to construct the THTR, no prior experience from the AVR could be brought forward since the AVR was not yet in production. Even so, it was a bold decision to construct a new reactor with such a high capacity as follow-on concept to the AVR and up to now it was the right decision.

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

The main design differences of the THTR to the AVR were:

- Pre-stressed concrete pressure vessel instead of steel. The dimension was 16 m in diameter and 18 m high and was designed this way mainly for safety reasons. A model with a scale of 1:20 was designed and tested by water pressure. First very small cracks occurred at a pressure between 90-120 bar. The main crack was reached at 190 bar. After pressure drop to 40 bar the vessel was nearly gastight again.
- A closed inner circuit for the He cooling gas to avoid the release of fission products and graphitic dust which for example could be partially contaminated with Sr-90, Cs-137, and/or Ag.
- No containment.
- Helium gas flow from top to bottom.
- TRISO pebble fuel elements.
- All other components such as blowers, fuel element feeding, helium gas circuits, steam generator, graphite structures, etc. were designed very similar to the components in the AVR.

Later calculations of the reactor core showed that the diameter of the core was

4. Der THTR-300 in Hamm-Uentrop/ Schmehausen

Das grundlegende Design des THTR-300e1 Demonstrationsreaktors wurde im Jahre 1965 begonnen. Als diese Entscheidung getroffen wurde, den THTR zu konstruieren, konnten Erfahrung von dem AVR nicht berücksichtigt werden, da dieser noch nicht in Produktion war. So war es eine mutige Entscheidung, den neuen Reaktor mit einer solch hohen Kapazität als unmittelbare Nachfolge zum AVR zu konstruieren, aber es war die richtige Entscheidung.

Die Hauptdesignunterschiede des THTR zum AVR waren:

- Druckbehälter aus vorgespanntem Beton anstelle Stahl. Der Durchmesser war 16 m und die Höhe 18 m. Diese Konstruktion wurde hauptsächlich aus Sicherheitsgründen gewählt. Ein Modell im Verhältnis 1:20 wurde gebaut und mit Wasserdruck getestet. Erste sehr kleine Risse traten auf bei einem Druck zwischen 90 und 120 bar. Der Haupttriss entstand bei 190 bar. Nach Druckabfall auf 40 bar war der Behälter wieder nahezu gasticht.
- Der innere Kreislauf für das Kühlgas war abgeschlossen, um die Freisetzung von Spaltprodukten und Graphitstaub zu vermeiden, die zum Beispiel teilweise mit Strontium -90, Cäsium-137 und/oder Silber hätten verseucht sein können.
- Es existierte kein Containment.
- Das Heliumgas floss von oben nach unten.
- TRISO-KugelBE wurden eingesetzt.
- Alle weiteren Komponenten wie Gebläse, BE Zufuhr, Heliumgaskreisläufe, Dampferzeuger, Graphitstrukturen, etc. waren ähnlich den Komponenten des AVR Jülich konstruiert.

Neuere Berechnungen des Cores zeigten, dass sein Durchmesser zu groß war und die Abschalt-Stäbe in der Graphit-Auskleidung das Kugelbett bei Abschaltung nicht auf die notwendige niedrige Temperatur abkühlen konnten. Damals lagen keine Langzeit-Erfahrungen mit dem Verhalten der Graphitreflektoren bei Betrieb vor.

Deshalb wurde entschieden die Abschalt-Stäbe

too large and the shutdown rods in the surrounding graphite structure could not cool down the fuel bed to the necessary low temperature in case of a shutdown of the reactor. Up to this time no experience was available with the behavior of the graphite core structure in long time operation. Therefore, a decision was made to insert the shutdown rods into the fuel bed with the danger that fuel elements could be crushed. Also, a decision was made to design a new extraction device for the pebbles which was very different from the extraction device used by the AVR. Both of these decisions were made without any prior experience of similar designs.

These both decisions were discovered to be mistakes after the power plant was put into operation. There was no nuclear risk at all, but the operation led to difficulties. The rupture of pebbles was 0.6%, very high compared to the results of the AVR at 0.0092%.

The positive results of the operation of THTR-300el are as follows:

- HTR power stations can be operated and connected to the network in the same way as conventional plants.
- Rupture of fuel elements does not increase the radioactivity of the helium cooling gas.
- Thermodynamic efficiency can be as high as in the best conventional power plants, two times intermediate reheating of the steam is possible.
- The nuclear and radiological safety of personnel and the environment is excellent.
- No radiation injuries, neither in the AVR nor in the THTR-300, occurred.

direkt in das Kugelbett einzuführen, auf die Gefahr hin, dass BE zerquetscht werden könnten. Auch wurde eine neue Abzugseinheit für die Kugeln konstruiert.

Beide Entscheidungen wurden ohne irgendeine frühere Erfahrung mit ähnlichen Designs getroffen. Diese beide Entscheidungen haben sich als falsch erweisen nachdem der Betrieb aufgenommen worden war.

Es gab zwar keinerlei atomares Risiko, aber der Betrieb führte zu Schwierigkeiten. Der Kugelbruch stieg auf 0,6%, sehr hoch verglichen mit den Ergebnissen des AVR(0,0092%.)

Die positiven Ergebnisse des Betriebs beim THTR-300el sind:

HTR-Kraftwerke können ans Strom-Netz ebenso wie herkömmliche Anlagen angeschlossen werden

Bruch von Kugel-BE erhöht in keiner Weise die Kontamination des Kühlgas Helium.

Thermodynamische Wirkungsgrad kann so hoch sein, wie in den besten konventionellen Kraftwerken, eine zweistufige Zwischenüberhitzung des Dampfes ist möglich.

Die nukleare und radiologische Sicherheit des Personals und der Umwelt ist hervorragend.

Strahlenschäden sind weder im AVR noch im THTR-300 jemals aufgetreten.

. 5. New Design of large HTR-Reactors with Ring-Cores

The longtime operational experience of the AVR and despite the relatively short period of 3 years operation of the THTR, many important discoveries were generated from these two plants which are necessary for the design and construction of new and future commercial HTR power plants. It is possible to design plants with higher capacity up to 4,000 MW_{th}, and it will be possible to operate them with very high efficiency and reliability.

So new HTR power plants can be designed with the same high capacity as the most modern PWR-Gen.IV power stations.

The experiences with graphite structures in the AVR and THTR-300 were excellent. Therefore this core design may not produce any problems. The designs in AVR and THTR had been constructed without any experience as first time solutions.

Now we have a lot of long time experience and additional design possibilities to construct graphite cores with very high stability. An internal inspection of the graphite structure of the AVR after more than 22 operational years showed not the smallest shift of graphite blocks. Furthermore the development of graphite as suitable material in HTR-Reactors has made good progress in the meantime.

5. Neues Design für große HT – Reactoren mit Ring-Kernen

Die Langzeit-Betriebserfahrung des AVR Jülich und trotz des verhältnismäßig kurzen Zeitraums von 3 Jahren Betrieb THTR Hamm ergaben viele wichtige Erkenntnisse. Diese sind für den Entwurf, die Konstruktion und den Bau von neuen und künftigen kommerziellen HTR-Kraftwerken notwendig und unerlässlich. Es ist möglich, Anlagen mit höheren Kapazitäten, bis sogar zu 4.000 MW_{th} / 1.600 MW_{el} zu konstruieren, und sie mit sehr hohem Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit zu nutzen.

Daher können neue HTR-Kraftwerke mit der gleichen hohen Kapazität errichtet werden, wie die modernsten PWR (Druckwasser)-Gen.IV Kraftwerke.

Die Erfahrungen mit der Graphitstruktur (Auskleidung) im AVR und im THTR-300 waren ausgezeichnet. Deshalb bereitet diese Bauweise für das Reaktortcore keine Probleme. In den AVR und den THTR waren sie ohne jegliche Erfahrung erstmals eingesetzt worden.

Jetzt haben wir viel Langzeit-Erfahrung und zusätzliche Möglichkeiten zur Konstruktion der Graphit- Core mit sehr hoher Stabilität.

Eine interne Untersuchung der Graphitstruktur des AVR nach über 22 Betriebsjahren zeigte nicht die kleinste Verschiebung der Graphitblöcken. Außerdem hat mittlerweile die Entwicklung geeigneter Graphitsorten als Baumaterial in HTR gute Fortschritte gemacht.

The main design features for this very new concept

Figure 10. New Design of a Ring Core Pebble Bed Reactor.

must be:

- TRISO pebbles as fuel elements.^{1,2}
- Use of U-235 together with Th-232 to breed U-233.
- Pre-stressed concrete pressure vessel;
- New design of a Pebble-Bed-Ring-Core /PBRC/ with several extraction devices for the pebbles, Fig. 10.
- An additional advantage of a Ring Core is the better and more regular/symmetrical flow of pebbles through the core. This leads to higher burn down of the pebbles and better cooling of the complete pebble bed.
- Shut down rods, only inserted in the graphite structures.
- He/He-heat exchangers in the interior of the pressure vessel.
- Outside steam generators, He/H₂O for use in power plants to produce electrical energy in steam turbine generators as well as high temperature gases for operation of chemical processes, e.g. to synthesize hydrocarbon fuel from abundant feedstocks, such as coal or biomass, to produce, for example, liquid fuel or for high temperature heat in a variety of chemical plants.

Die Hauptkriterien für dieses sehr neue Konzept sind:

TRISO-Kugeln als BE

Verwendung von U-235 zusammen mit Th-232 um U-233 zu erbrüten

Druckbehälter aus vorgespanntem Beton

Die neue Gestalt Kugelbett-Ring-Core mit mehreren BE-Abzugseinheiten für die umzuwälzenden Kugeln.

Ein zusätzlicher Vorteil des Ring Core ist der regelmäßiger / symmetrischer Fluss der Kugeln durch den Kern. Dieses führt zu einem stärkeren Abbrand und effektiverer Kühlung des Kugelbettes

Abschaltstäbe sind nur in die Graphit-Auskleidungen geführt.

Der Helium/Helium Wärmetauscher innerhalb des Druckbehälters.

Außen liegende Dampferzeuger, Helium/Wasser, zur Erzeugung elektrischer Energie in Dampfturbinen mit Generatoren oder Hochtemperatur-Gase zum Betrieb chemischer Prozessen. Zum Beispiel um Kraftstoff aus Kohlenwasserstoffen von Vieh (Methan), Kohle oder Bioabfall zu synthetisieren, flüssige Treibstoffe nach Fischer Tropsch zu erzeugen oder Hochtemperatur-wärme für viele Chemiefabriken zu liefern

So they may not produce difficult technical problems.

- Inherent safety features of the reactor are paramount. As twice tested in the AVR and in the HTR-10. A major accident is not possible for nuclear physics reasons.

- In case of an accident the rest-heat of the core can be removed by the heat exchangers and by the water cooling system of the liner.

At the end of operational life of the reactor, all radioactive components can be stored in the concrete pressure vessel. This is one of the main experiences to store the radioactive components very safely in the concrete pressure vessel of the THTR, now for more than 22 Years. All of the burned out pebbles used in the AVR and THTR power plants are currently stored in cast iron "castor" containers in Ahaus, Germany. The measured radioactivity outside the containers is as low as 0,001mS. Temperatures in the interior of the containers lower than 50° C are measured.

All experiences and the design shows, that all safety reevaluations for HTR-concepts³, proposed by R. Moormann,-FZ Jülich-, in 2008, which caused large political trouble in Germany in 2009, were already considered and solved in the design of THTR-300. He did not refer in his paper to the design of the THTR-300 with a single argument. So there is not a single new proposal or understanding in this report with regards to the existing knowledge in 1966. (Moormann refused several demands to discuss his paper. The management of Fz-Jülich had been recommended by writing to withdraw this paper, as it is a disgrace. No answer, no comment up to now.)

Da die anderen Komponenten weitestgehend ähnlich denen im AVR und THTR sind, sind gravierende technische Probleme nicht zu erwarten.

Inhärente Sicherheitsfunktionen des Reaktors sind entscheidend. Die bereits zweimal unter Beweis gestellte Sicherheit im AVR und in China zeigen, daß MCA/Gau als schwerste anzunehmende Unfälle nicht eintreten können.

Bei einem Ausfall der Kühlung kann die Nachzerfallswärmedurch die Wärmetauscher und das Kühlungssystem des Liners abgeführt werden.

Am Ende der Laufzeit des Reaktors können alle radioaktiven Komponenten im Beton-Druckbehälter gelagert werden.

Dieses ist eine der wichtigsten Erfahrungen, aus der nun schon 22-jährigen Lagerung radioaktiver Bauteile im Beton-Druckbehälter des THTR Hamm.

Alle abgebrannten Kugeln aus dem AVR Jülich und dem THTR-Kraftwerk in Hamm lagern z.Z. in den stählernen Castor Behältern in Ahaus, Westfalen. Die gemessene Radioaktivität außerhalb der Behälter beträgt nur 0,001milliSievert. Die Temperaturen innerhalb der Behälter sind unter 50°Celsius. Alle Erfahrungen und die Konstruktion zeigen dass alle Sicherheitsüberlegungen für HTR-Konzepte bereits im Design von THTR-300 betrachtet und gelöst waren.

Die von R. Moormann, FZ Jülich im Jahre 2008 vorgeschlagenen Neubewertungen dieser Massnahmen, die 2009 größere politische Diskussionen auslösten, sind daher falsch. Auf die Konstruktion des THTR ging Moormann niemals ein, ebenso wenig das FZ-Jülich. Es gibt keinen einzigen neuen Vorschlag oder neue Erkenntnis in seinem Bericht. Es wurde kein neues Wissen gegenüber dem 1966 vorliegenden Wissen vorgetragen (Moormann lehnte jedoch mehrere Versuche ab, mit ihm sein Papier zu besprechen. Dem Management des FZ-Jülich wurde empfohlen dieses Papier als Schande für die Forschung zurückzunehmen. Keine Antwort, kein Kommentar.)

Remains the question of possible problems with the Non-proliferation Treaty –NPT- , as PU may be produced by burning U238. The experience is, that PU is only produced as long as the pebbles are not nearly fully burnt-up. Extensive calculations and test were done in ZA⁴ showing, that combinations of PU 238/239/240/241/242, U235, Fissile PU i.e.PU 239 and PU 241 and Th can be burnt together in coated particles. So a Pebble Bed HTR can be used to burn-up PU. The design of the pebbles fuel cycle –Fig.7- shows, that every single pebble can and will be measured to the degree of burn-up. So with a HTR Pebble Bed Reactor the disposal of PU can be very extensively controlled, as each pebble can be treated individually. So very detailed and full control of PU disposal is guaranteed and possible by inspection. Further this experience proves that all problems of safe long-term final storage of burned fuel elements, components and other waste can be solved by this integrated concept of a new HTR power plant. No external storage or transportation of fuel elements or other radioactive material is necessary.

The engineering design of this concept is still completely available with the basic know how of all parts, circuits and components of AVR and THTR, as well as all fundamental documents for approval of all authorities for erection and operation.^{5,6,7}

So bleibt die Frage möglicher Probleme mit dem Nichtverbreitungsvertrag – Non Proliferation Treaty, da möglicherweise Plutonium (PU)produziert wird, indem man U-238 einsetzt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dieses PU nur produziert wird, solange die Kugel nicht fast völlig abgebrannt ist.

Umfangreiche Berechnungen und Tests wurden in Südafrika durchgeführt. Sie zeigen, dass Kombinationen von PU 238/239/240/241/242, U235, spaltbares PU (=PU 239) und PU 241 und Th können in den beschichteten Partikeln gemeinsam verbrannt werden können.

So kann ein Kugelbett-HTR auch zur nutzbringenden Entsorgung von Plutonium eingesetzt werden. Das Design des Kugel-Brennstoffkreislaufs – ist so ausgeführt, dass jede einzelne Kugel auf ihren Abbrand vermessen wird. So kann der Beseitigung von PU weitestgehend gesteuert werden, da jede Kugel einzeln behandelt wird. Ausführliche und vollständige Kontrolle der PU-Beseitigung ist damit garantiert und durch Inspektion überprüfbar. Weiter zeigt diese Erfahrung, dass alle Probleme der sicheren langfristigen Endlagerung abgebrannter BE, der Komponenten und anderen Abfalls durch dieses integrierte Konzept eines neuen HTR gelöst werden können. Kein externes Lager oder der Transport von BE oder von anderem radioaktivem Material ist notwendig. Die konstruktive Gestaltung dieses Konzeptes ist noch vollständig erprobt. Das grundlegende Wissen über alle Teile, Kreisläufe und Elemente von AVR und THTR sowie alle grundlegenden Dokumente für die Genehmigung sämtlicher Behörden zur Errichtung und Betrieb sind vorhanden..

6. Summary and Conclusions.

Future designs of HTR-Reactors should/must have the following important design elements, mainly for safety reasons:

- Inherently safe design.
- No melting of the core is possible.⁸
- Gastight integrated helium circuit.
- Smaller reactors with one central core can be designed with steel vessels, - example AVR-,
 - Larger reactors up to highest capacities should be designed with pre-stressed concrete pressure vessels, example THTR300.
- Pebble-Bed-Ring-Core /PBRC/ for higher capacities. No shut down rods into the pebble bed.
- Pebbles as fuel elements with TRISO coated particles.
- Small room is necessary to store the fuel elements.
- Safe against heavy earthquakes.
- Safe against terrorism and other greater/heavier accidents.
- Very good and simple control of nuclear material e.g. PU.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.

Zukünftige Konstruktionen von HT - Reaktoren sollten/müssen folgende wichtigen Gestaltungselemente aufweisen, hauptsächlich aus Sicherheitsgründen

- Inhärent sicheres Design.
- Kernschmelzen ist unmöglich
- Gasdichter integrierter Heliumkreislauf.
- Kleinere Reaktoren mit einem Core können aus Stahl konstruiert werden, - Beispiel AVR,
- Größere Reaktoren bis zu den höchsten Kapazitäten sollten mit Druckbehälter aus vorgespanntem Beton konstruiert sein, Beispiel THTR-300.
- Kugelbett-Ring-Core für die höheren Kapazitäten ist optimal, damit keine Abschaltstäbe ins das Kugelbett eingefahren werden.
- Kugeln als BE mit beschichteten Partikeln (TRISO).
- Für das Speichern der BE ist nur wenig Raum notwendig
- Sicher gegen schwere Erdbeben.
- Sicher gegen Terrorismus und andere große/schwere Unfälle.
- Sehr gute und einfache Überwachung des Nuklearmaterials (z.B. PU).

• This design will have the following main economical advantages:

- High primary helium gas temperatures up to 1100 °C;
- High He-primary and secondary gas/steam temperatures make it possible to reach high efficiency in secondary processes.
- High gas temperatures are the basic to install on secondary site I chemical processes to produce
 - e.g. hydrogen and/or liquid fuels.
- No shut down of the power plant for exchanging of fuel elements.
- Combination of producing electric power and heat for heat supply for different kinds of following processes.
- Thermodynamic water/steam circuit up to two times intermediate reheating of the steam.
- Thermodynamic efficiency as high as in conventional power plants
- Very high burn up of nuclear material.
- Use of Th 232 in combination with U 235 to produce U 233.
- Breeding of new nuclear material.
- Very good possibility to handle and store radioactive material, the pebbles included, in the power station.
- Long time storage of radioactive material is possible.
- No transportation of radioactive material outside the power station is necessary.
- Burn-up and "disposal" of PU included Weapons-PU.

This concept of an HTR makes it possible to build a nuclear power station without any danger of a major accident and promises high efficiency and longtime operational periods. The integrated design makes it possible to avoid any radioactivity outside the power station. After final shut down all radioactive waste, including the pebbles can be stored inside the concrete parts of the station. No radioactivity can or should be detected outside the plant. So this design will have the highest possible safety standard.^{8,9}

Dieses Design hat die folgenden hauptsächlich wirtschaftlichen Vorteile:

- Hohe Primär-Heliumgastemperaturen bis zu 1.100 oC;
- Hohe Temperaturen beim Helium-Primär-Kreislauf wie beim Sekundärkreislauf für Helium oder Dampf ermöglichen hohe Wirkungsgrade in den Sekundärprozessen
- Die hohen Gastemperaturen im Sekundär-Kreislauf sind die Grundlage für dahinter zu installierende chemische Prozesse, z.Beiispiel
 - Wasserstoff
 - Flüssigbrennstoffe.
 - Andere chem. Prozesse
- Kein Abschalten des Reaktors zum Austausch von BE.
- Kombination der Stromerzeugung und der Hochtemperatur für verschiedene Anschluss-Prozesse.
- Thermodynamischer Wasser-/Dampf Kreislauf bis zweifacher Zwischenerhitzung des Dampfs.
- Thermodynamischer Wirkungsgrad so hoch wie in konventionellen Kraftwerken
- Sehr hohe Ausnutzung/Abbrand des Kernbrennstoffes.
- Verwendung von Th-232 zusammen mit U 235, um U 233 zu erbrüten.
- Erbrüten neuen Kernbrennstoffes.
- Sehr gute Möglichkeit zur Endlagerung aller radioaktiven Materials, inkl. die Kugeln direkt im Reaktorgebiet.
- Langzeit-Speicherung des radioaktiven Materials.
- Kein Transport radioaktiven Materials außerhalb des Kraftwerks.
- Verbrennen und damit „Beseitigung“ von PU einschließlich Waffen-Plutonium.

Dieses Konzept eines HTR ermöglicht die Errichtung von Kernkraftwerken ohne jede Gefahr katastrophaler Unfälle und verspricht hohe Wirkungsgrade und langfristigen Betrieb. Das integrierte Design ermöglicht es, jede denkbare Radioaktivität außerhalb des Kraftwerks zu vermeiden. Nach endgültigem Abschalten kann der gesamte radioaktive Abfall, einschließlich der Kugeln innerhalb der Betonbauwerke gelagert werden. Außerhalb der Anlage kann und soll keine Radioaktivität festgestellt werden. Damit erfüllt dieses Design die höchstmöglichen Sicherheitsnormen.

| References | |
|--|---|
| <p>1 H. NABIELEK, K. VERFONDERN, M. J. KANIA, HTR Fuel Testing in AVR and MTRs. HTR Conference, Prague (2010).</p> <p>2 H. NABIELEK, C. TANG, A. MÜLLER, “Recent Advances in HTR Fuel Manufacture”. HTR Conference, Prague (2010).</p> <p>3 R. MOORMANN, A Safety Re-evaluation of the AVR Pebble Bed Reactor Operation and its Consequences for Future HTR Concepts, FZ-Jülich Report 4274 (2008).</p> | 4 |
| <p>1 E.MULDER, D.SERFONTEIN, W.VAN DER MERVE; E.TEUCHERT: Thorium and uranium fuel cycle symbiosis in a Pebble Bed High Temperature Reactor. Proceedings of HTR 2010 Prague 2010.</p> <p>2 U. CLEVE, The Design of High Temperature Reactors (Die Technik der Hochtemperaturreaktoren), Atomwirtschaft atw (12/2009 with 35 lit.refers.).</p> <p>3 U. CLEVE, Nuclear High Temperature Technology to Produce Liquid Fuel of Hydrocarbon and Electrical Power (Nukleare Hochtemperaturreaktortechnik zur Erzeugung flüssiger Brennstoffe, von Wasserstoff und elektrischer Energie), atw (4/2011 with 23 lit.refers.) .</p> <p>4 K. KNIZIA, Der THTR-300- eine vertane Chance? Atomwirtschaft-atw(7/2002)</p> <p>5 K.Kugeler, Gibt es einen katastrophenfreen Kernreaktor? Physikalische Blätter 37(2001),Nr.11.</p> <p>6 H.Bonnenberg: High Temperature Gas-Cooled Reactor with Spherical Fuel Elements – A German Development Implemented Abroad. DGAP-2007.</p> | |