

Dies ist eine erste Rohfassung. Eine überarbeitete Fassung folgt.

In diesem Beitrag wird die historische Entwicklung des gasgekühlten Hochtemperaturreaktors (HTGR) in China erörtert. Chinas Entwicklungsstrategie für den HTGR wird in diesem Text erläutert. Das Ziel, der Entwurf, der Bau und die Inbetriebnahme des 10-MW-HTGR-Testmoduls (HTR-10) werden hier erläutert. Die technischen Experimente, die für den HTR-10 entwickelt wurden, werden ebenfalls vorgestellt. Die Erfahrungen, die zu einer Anhäufung von Wissen während der Entwicklung von Chinas HTGR geführt haben, werden in diesem Artikel zusammengefasst.

### **Rückblick auf das HTGR-Programm in China**

In China begann das Forschungs- und Entwicklungsprogramm für den gasgekühlten Hochtemperaturreaktor (HTGR) Mitte der 1970er Jahre. Das Institute of Nuclear Energy Technology (INET) war das renommierteste und angesehenste Institut in China für das HTGR-Forschungs- und Entwicklungsprogramm. Zu dieser Zeit wurde das Ziel des Baus eines thermischen Thorium-Brüters mit einer Leistung von 100 MW(+) festgelegt. Der konzeptionelle Entwurf eines Kugelhaufen-HTGR mit einem Kernmantel aus zwei Zonen wurde fertig gestellt (Zhao et al., 2001). Dieses Konzept zeichnete sich aus durch:

1. die Kompaktheit (hohe spezifische Leistung)
2. hohes Brutverhältnis (annähernd eins in einem so kleinen Reaktor)
3. die Betriebsfähigkeit (inhärent stabil, Fähigkeit zum Nachladen unter Last usw.)

Der HTGR wurde für den Betrieb mit einem Thoriumzyklus konzipiert. Es wurden Computerprogramme für die Reaktor-Neutron-Physik, die Thermohydraulik usw. entwickelt. Parallel dazu wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt. Diese Experimente umfassten:

1. einen Modellversuch für einen Reaktorbehälter aus Spannbeton im Verhältnis 1:10
2. einen seismischen Modellversuch für die 1:10 Ganzgraphit-Kernstruktur
3. einen Test für das Brennelementhandhabungssystem (einschließlich der Komponenten)
4. einen mechanischen Festigkeits- oder Krafttest für die geneigten, speziell geformten Graphit-Stützbalken am Boden des Kerns (wobei die mit Stahlkugeln auf die äußerste Graphitstruktur ausgeübte Druckkraft als Bindungskraft diente, während sich die Struktur frei ausdehnen und zusammenziehen konnte)
5. Test des Steuerstabantriebsmodells 1:2,7 und 1:1
6. Versuche zur Stabilität der Zweiphasenströmung und zum vibrationsbedingten Verschleiß des Dampferzeugers
7. Versuche an ölgeschmierten Lagern für Heliumgebläse
8. der statische Dichtungstest
9. die Forschung zur chemischen Wiederaufbereitung thoriumhaltiger abgebrannter Brennelemente (einschließlich der Abtrennung von Uran und Thorium aus den abgebrannten Brennelementen und des Einschlusses von Protactinium in mikroporösem Glas mit hohem Siliziumgehalt sowie der Wirbelschicht-Dampf-Denitration der Thoriumnitratlösung)
10. die Entwicklung von Nukleargraphit

## 11. die Erforschung der Technologie für Brennelemente

Der Bau dieses Reaktors wurde aus verschiedenen Gründen auf unbestimmte Zeit verschoben, hauptsächlich wegen der Finanzierung.

Während des sechsten Fünfjahresplans (1981-1985) begann das Staatliche Komitee für Wissenschaft und Technologie mit der finanziellen Unterstützung der Forschung für die Basistechnologie des HTGR. Das Hauptziel bestand darin, die Konstruktion des Hochtemperaturreaktormoduls (HTR-Modul) zu vollenden, die Sicherheit eines mechanischen Festigkeits- oder Krafttests für die geneigten, speziell geformten Graphitstützen des HTR-Moduls zu erforschen und Computerprogramme für die Neutronenphysik des Reaktors, die Thermohydraulik und Sicherheitsanalysen zu entwickeln. Die konzeptionellen Entwürfe für das "HTR-Modul-334" (Zhong und Gao, 1985), ein HTR-Modul mit 334 MW thermischer Leistung und Brennstoff-Multipass-Betrieb, sowie für das "HTR-OTTO-200" (Zhong und Gao, 1985), ein HTR-Modul mit 200 MW thermischer Leistung und Einmal-Durchlauf-Betrieb, wurden abgeschlossen.

In der Zwischenzeit wurde eine Design-Modifikation für ein deutsches HTR-Modul vorgenommen. Mit dem neuen Entwurf (Wang, 1982) wurde die thermische Leistung gegenüber dem ursprünglichen Entwurf fast verdoppelt (von 250 auf 500 MWt) für ein einzelnes Modul), ohne die inhärenten Sicherheitsmerkmale zu opfern und bei gleichzeitiger deutlicher Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Der Grundgedanke dieses Entwurfs war die Einführung eines gezonten Kerns mit einer nicht mit Brennstoff gefüllten zentralen Säule aus Graphitkugeln. Da der innere Kern keinen Brennstoff enthält, verschiebt sich der heiße Punkt nach außen, und die maximale Brennelementtemperatur wird nach einem hypothetischen totalen Kühlmittel-Verlust nie über die Sicherheitsmarge von 1600 °C ansteigen. Wegen des größeren Kerndurchmessers wurde ein Spannbetonbehälter gewählt.

Parallel dazu wurde eine Studie über die Verteilung von Wärmequellen für verschiedene Industriezweige durchgeführt, um die Möglichkeit zu untersuchen, den HTGR als Wärmequelle für andere Zwecke als die Stromerzeugung zu nutzen. Die Schlussfolgerung dieser Studie basierte auf Chinas technischem Wissen, und zu diesem Zeitpunkt war es wahrscheinlich, dass der HTGR neben der Verwendung in der petrochemischen und chemischen Raffinerieindustrie auch für die Schwerölgewinnung eingesetzt werden könnte. INET und das KFA Jülich, Deutschland, haben gemeinsam eine technische und wirtschaftliche Machbarkeitsstudie zur Nutzung des HTGR als Wärmequelle für die Schwerölgewinnung und die petrochemische Industrie durchgeführt. Das Shenli-Ölfeld, das größte Schwerölfeld Chinas, und der Yanshan-Chemiekomplex waren Kandidaten, die sich für den Einsatz unseres HTGR als Wärmequelle interessierten. Siemens/KWU und BBC/HRB waren ebenfalls an dieser Machbarkeitsstudie beteiligt. Die Ergebnisse dieser Studie (INET und KFA, 1988) zeigten, dass es aus technischer Sicht möglich ist, den HTGR sowohl für die Schwerölproduktion als auch für die chemische Raffinerieindustrie zu nutzen. Aus ökologischer Sicht ist es unter bestimmten Bedingungen auch möglich, mit Anlagen für fossile Brennstoffe zu konkurrieren.

Nach dem Start von Chinas nationalem Forschungs- und Entwicklungsprogramm für Hochtechnologie im Jahr 1986 (genannt 863-Programm) war das HTGR-Forschungs- und Entwicklungsprogramm im Bereich Energie für das 863-Programm tätig. Der HTGR wurde als

einer der fortschrittlichsten Reaktoren für den Einsatz im 21. Jahrhundert anerkannt, da er über inhärente Sicherheitsmerkmale verfügt. Von 1986 bis 1990 wurden acht Forschungsthemen für wichtige Technologien (Zhao et al., 2001) definiert und umgesetzt. Zu diesen acht Themen gehörten:

1. ein konzeptioneller Entwurf und die Programmierung von Computerprogrammen für die Neutronenphysik des Reaktors, die Thermohydraulik und die Analyse von Sicherheitsfragen
2. die Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Brennelemente
3. die Wiederaufarbeitung des Thorium-Uran-Brennstoffkreislaufs
4. der innere Aufbau des keramischen Reaktors zusammen mit einer Spannungsanalyse
5. die Entwicklung der Heliumtechnologie
6. die Auslegung der Druckbehälter
7. die Entwicklung eines Brennstoffbehandlungssystems
8. Entwicklung von Werkstoffen

Es wurden zahlreiche Versuchsgeräte gebaut. Zu diesen Apparaten gehören:

1. die Brennvorrichtung für die Wiederaufbereitung der Graphitkugeln
2. der Heliumkreislauf
3. ein Fertigungslabor für Brennelemente
4. verschiedene Instrumente zur Bestimmung der Eigenschaften von Brennelementen
5. Geräte zur Handhabung des Brennstoffsystems
6. der Helium-Reinigungs-Testkreislauf

Eine theoretische Berechnung für das HTR-Modul mit einer thermischen Leistung von 200 MW wurde abgeschlossen. Zu den Fortschritten bei der Materialentwicklung gehören:

1. Graphit in Nuklearqualität
2. Hochtemperatur-Isolierung
3. die Herstellung von Hochtemperaturlegierungen für den Dampferzeuger

Mit dem Bau eines echten HTGR-Reaktors sollte nach Abschluss der acht oben genannten Forschungsthemen begonnen werden.

### **Wieso erkannte China den HTRG als einen der fortschrittlichsten Reaktoren, die im Rahmen des Programms 863 entwickelt werden sollten?**

China kam zu diesem Schluss aufgrund

- der Entwicklungsgeschichte der Kernenergie,
- der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit und
- der Sicherheitsprobleme, die die Nutzung der Kernenergie weltweit behindert haben.

Wenn man die höheren Stromkosten und Anfangsinvestitionen für Kernkraftwerke mit denen für fossile Brennstoffe vergleicht, ziehen Versorgungsunternehmen in der Regel die Nutzung ihrer fossilen Brennstoffressourcen der Nutzung von Kernkraftwerken vor. Die Unfälle in den Kernkraftwerken TMI und Tschernobyl haben dazu geführt, dass sich die Menschen große Sorgen über den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken machen. Nach diesen Unfällen kam es zu Akzeptanzproblemen in der Öffentlichkeit, und die Akzeptanz von Kernkraftwerken war auf einem historischen Tiefstand. Für die neue Generation von Kernenergiesystemen ist die Sicherheit das wichtigste Anliegen. Andererseits wird aus marktwirtschaftlicher Sicht erklärt, dass

Kernkraftwerke fossile Kraftwerke nur dann ersetzen können, wenn die Stromkosten von Kernkraftwerken unter oder mindestens gleich den Stromkosten der fossilen Kraftwerke liegen.

Die vorhandenen Reaktoren in der Welt verfügen derzeit über ausreichende Sicherheitsmargen, um auslegungsüberschreitende Unfälle zu beherrschen. Das scheint jedoch nicht ausreichend, um auch die Öffentlichkeit von der Nutzung von Kernkraftwerken zu überzeugen – insbesondere in Deutschland. Daher müssen Änderungen und Verbesserungen vorgenommen werden, wenn die Öffentlichkeit den Einsatz von Kernkraftwerken akzeptieren soll. Kernkraftwerke auf der Basis des HTR-Moduls mit TRISO Elementen könnten die Akzeptanz der Bevölkerung erreichen, weil das HTR-Modul einzigartige, inhärent sichere Eigenschaften aufweist. Deutsche Experten haben nachgewiesen, dass die Temperatur der Brennelemente bei einem Unfall die 1600 °C-Grenze nicht überschreiten wird. Damit sind kernschmelzartige Unfälle im HTR-Modul nicht möglich (Lohnert, 1990). Da der Kern nicht schmelzen kann, kann die Umgebung außerhalb des HTR-Moduls nicht kontaminiert werden.

In den 1980er Jahren kamen wir zu dem Schluss, dass Wirtschaftlichkeit durch Serienfertigung und hohen thermischen Wirkungsgrad im modularen HTGR mit einem Dampfturbinenkreislauf realisiert werden kann. Zumindest kann die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit mit Leichtwasserreaktoren und möglicherweise mit fossilen Kraftwerken erreicht werden. Außerdem wäre eine niedrige Anfangsinvestition ein Vorteil für China oder jedes andere Entwicklungsland. Dieser Vorteil würde es ermöglichen, Kernkraftwerke auf dem Weltmarkt einzuführen.

Auf der Grundlage der beiden oben genannten Überlegungen beschloss INET, die Entwicklung des modularen HTGR fortzusetzen und dabei die Unterstützung des Programms 863 zu nutzen. Dies geschah zu einer Zeit, in der die Entwicklung des HTGR in den meisten anderen Ländern inakzeptabel war.

Nachdem die Entscheidung getroffen war, welcher Reaktortyp in China entwickelt werden sollte, stellte sich die nächste Frage: Wie entwickeln wir diese Reaktoren? Es gab mehrere Möglichkeiten, wie der HTGR auf dem chinesischen Markt eingeführt werden könnte. Eine Möglichkeit wäre die Gründung eines Joint Ventures mit einem anderen Land oder Unternehmen mit dem Ziel, einen Prototyp der modularen HTGR-Anlage zu bauen. Es wäre jedoch einfacher und schneller, den modularen HTGR auf dem chinesischen Markt einzuführen, wenn China ihn selbst bauen würde. Der Grund dafür ist, dass die modulare HTGR-Technologie bereits anderswo in der Welt entwickelt wurde und es daher unnötig wäre, einen Versuchsreaktor in China zu bauen. Dies ist natürlich normalerweise der erste Schritt bei der Entwicklung neuer Reaktortypen. Die Investitionen zur Erlangung staatlicher Unterstützung wären jedoch zu hoch gewesen, um sie zu realisieren. Außerdem mussten wir die chinesische industrielle Basis berücksichtigen. Daher war das Risiko dieser Option hoch.

Eine weitere Option war, mit dem Bau eines Versuchsreaktors mit geringer thermischer Leistung zu beginnen, um das für den Einsatz der modularen HTGR-Technologien erforderliche Know-how zu erwerben. Dadurch würde ein praktisches Modell entstehen, das die inhärenten Sicherheitsmerkmale dieses Reaktortyps demonstriert. Natürlich sollte dieser Versuchsreaktor die grundlegenden Merkmale des modularen HTGR repräsentieren, so dass es einfach wäre, den Prototyp des modularen HTGR fertig zu stellen, ohne dass die Investitionen für diesen

Versuchsreaktor unerschwinglich wären. Das INET kam zu dem Schluss, dass diese Option die realistischere und für die damaligen Bedingungen in China geeignetere ist. Außerdem hat INET seit den 1980er Jahren eine gute Zusammenarbeit mit dem Fz Jülich und Siemens/Interatom in Deutschland und verfügte mit Hilfe deutscher Experten über einige Kenntnisse über Kugelhaufenreaktoren. Insbesondere Siemens äußerte, dass sie das INET bei der Entwicklung eines HTGR-Programms sowohl technologisch als auch finanziell zu bestimmten Bedingungen unterstützen wollten. Daher beschloss das INET zusammen mit Siemens/Interatom, ein 10 MW HTGR-Testmodul (HTR-10) am INET zu bauen (Steinwarz und Xu, 1990).

## **2. Entwurfskonzept und Ziele des HTR-10**

Es war klar, dass der Entwurf, der Bau und der Betrieb des HTR-10 ein wichtiger Schritt in Richtung Kommerzialisierung des modularen HTGR in China war. Dies kann in der Tat die zukünftige Entwicklung des HTGR beeinflussen. Der erfolgreiche Entwurf, Bau und Betrieb des HTR-10 würde die Kommerzialisierung des modularen HTGR sicherlich fördern und beschleunigen. Sollte ein Problem auftreten, das wir während der Entwicklung, des Baus und des Betriebs des HTR-10 nicht lösen können, würde die staatliche Unterstützung für den Modularen HTGR eingeschränkt oder möglicherweise eingestellt werden. Der erfolgreiche konzeptionelle Entwurf des HTR-10 wurde zu einer entscheidenden Frage.

Bei der Konzeption des HTR-10 wurden die folgenden kritischen Punkte berücksichtigt (Sun und Xu, 2000):

(1) Es wurde ein Kugelhaufenreaktor anstelle eines Blockreaktors gewählt. Der Grund für die Wahl des Kugelhaufenreaktors war, dass wir bereits seit fast 20 Jahren an der Erforschung der Komponenten und Computerprogramme für diesen Reaktortyp beteiligt waren. Das INET hat eine positive und produktive Forschungszusammenarbeit mit deutschen Unternehmen und akademischen Einrichtungen. Technisch gesehen waren wir der Meinung, dass das deutsche Design des HTR-Moduls für die Entwicklung in China besser geeignet ist und einen leichteren Übergang von unserem kleineren Versuchsreaktor zu einem größeren Prototypreaktor ermöglichen würde.

(2) Die thermische Leistung von 10 MW wäre sowohl für die Anfangsinvestition, die durch das Programm 863 unterstützt wird, als auch für den Übergang geeignet, da die Skalierung vom HTR-10 zu einem Prototyp-HTR-Modul nicht zu groß ist. Die Fertigungsindustrien in China verfügen bereits über die Kapazitäten und die Ausrüstung zur Herstellung der für den Bau des HTR-10 erforderlichen Komponenten. Es wären keine zusätzlichen Produktionsanlagen erforderlich. Diese Fertigungskapazitäten könnten den Bau des HTR-10 beschleunigen und gleichzeitig die Kosten für die Erstinvestition senken.

(3) Um den Übergang vom HTR-10 zu einem Prototyp des HTR-Moduls zu erleichtern, ohne dass Forschung und Entwicklung in der Zukunft erneut durchgeführt werden müssen, sollte der HTR-10 grundsätzlich die kritischen Merkmale des HTR-Moduls aufweisen, z. B. den Side-by-Side- und Multi-Loading-Modus, Steuerstäbe an den Reflektorseiten, Confinement usw. Diese Komponenten könnten dazu führen, dass die Konstruktion des HTR-10 komplexer wird. Es war jedoch von entscheidender Bedeutung, diese Merkmale beim Bau des HTR-10 zu berücksichtigen. Nach dem erfolgreichen Betrieb des HTR-10 wäre es einfacher, den Prototyp des HTR-Moduls zu bauen, wenn China über das Know-how zur Herstellung der größeren Komponenten verfügt. Die Urananreicherung ist aufgrund des kleineren Reaktorkernvolumens höher als bei einem

HTR-Modul. Bei Verwendung des HTR-10 für den Gasturbinentest würde die Anordnung des Dampferzeuger-Druckbehälters im HTR-10 in Zukunft etwas anders sein. Um den HTR-10 für die Durchführung von Sicherheitsexperimenten nutzen zu können, wurden für einige Systeme zusätzliche konstruktive Überlegungen angestellt, z.B. für das Hohlraumkühlsystem, das nicht nur zur Abfuhr der Nachwärme, sondern auch zur Senkung der Reaktorbetriebsleistung während des Massenbrennelemente-Experiments bei einer Temperatur von 1600 °C eingesetzt wird. Das heißt, der HTR-10 wird mit geringerer Leistung betrieben, um den Kern ohne den Betrieb des zweiten Kreislaufs (Wäremesenke) aufzuheizen, bis sich die Temperatur der Brennelemente 1600 °C nähert. Nur das Hohlraum-Kühlsystem wird betrieben, um den Wärmeausgleich zu schaffen und den Beton zu kühlen. Daher werden die meisten Brennelemente eine Temperatur von etwa 1600 °C erreichen. Dann wird es möglich sein, die Radioaktivität des Heliums zu messen und die Leistung der Brennelemente zu untersuchen.

(1) Es wurde beschlossen, den HTR-10 zur Stromerzeugung zu nutzen, obwohl seine Leistung begrenzt sein würde. Der Vorteil der Verwendung des HTR-10 zur Stromerzeugung bestand darin, Betriebskosten zu sparen und ein "echtes Kraftwerk" anstelle eines Versuchsreaktors zu zeigen. Der erfolgreiche Betrieb des HTR-10 wäre entscheidend, um von der chinesischen Regierung die Genehmigung für den Bau des HTR-Moduls zu erhalten, um den künftigen Energiebedarf Chinas zu decken.

(2) HTGR-Anwendungen und sicherheitsrelevante Experimente wurden bei der Konzipierung berücksichtigt. Zu diesen Anwendungen und sicherheitsrelevanten Fragen gehörten: ein Massentest der Brennelemente bei einer Temperatur von 1600 °C und die Untersuchung der Möglichkeit von Prozesswärmeanwendungen.

Kurzum, die Hauptziele des HTR-10 waren (Steinwarz und Xu, 1990):

1. Erwerb von Know-how für die Auslegung, den Bau und den Betrieb von HTGRs
2. die Errichtung einer Bestrahlungs- und Versuchsanlage
3. die inhärenten Sicherheitsmerkmale des modularen HTGR zu demonstrieren
4. Erprobung der Kraft-Wärme-Kopplung und der Gasturbinentechnologie mit geschlossenem Kreislauf
5. Abschluss der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für nukleare Prozesswärmeanwendungen

### **3. Entwurf, Bau und Inbetriebnahme des HTR-10**

Das INET beschloss, gemeinsam mit Siemens/Interatom die konzeptionelle Auslegung des HTR-10-Reaktors vorzunehmen. Dieser gemeinsame Entwurf wurde initiiert, um mehr Erfahrung und ein besseres Verständnis der Siemens/Interatom-Teams zu erhalten. Der konzeptionelle Entwurf begann 1988 am INET. Zehn INET-Ingenieure wurden zu Siemens/Interatom entsandt, um das Design des HTR-Moduls zu beherrschen und das konzeptionelle Design des HTR-10 umzusetzen. Dieser gemeinsame Entwurf wurde 1990 abgeschlossen (Steinwarz und Xu, 1990). Leider wurde die Fortführung des gemeinsamen Projekts zur Fertigstellung des HTR-10 unterbrochen.

In den Jahren 1991-1992 führte INET eine Vorstudie zur Machbarkeit des HTR-10-Projekts

durch. Auch die notwendigen Verfahren zur Initiierung eines Projekts in China wurden abgeschlossen. Die Genehmigung für den Bau des HTR-10 wurde vom Staatsrat im März 1992 erteilt. Nach Erteilung der Baugenehmigung erstellte INET den Umweltverträglichkeitsbericht für den HTR-10, um den Standort des HTR-10 zu bestimmen. Diesen Bericht reichten wir Mitte 1992 bei der nationalen Umweltschutzbehörde ein. Dieser Umweltverträglichkeitsbericht wurde von einem Umweltausschuss mit Fachkenntnissen auf dem Gebiet der Kernenergie geprüft. Dieser Bericht wurde im Dezember 1992 genehmigt. Dieser Umweltverträglichkeitsbericht ist nur einer der erforderlichen Anträge für den Reaktorstandort. Der Standort- und Erdbeben-Report, für den HTR-10, wurde der National Nuclear Safety Administration vorgelegt. Nach einer eingehenden Prüfung dieses Berichts wurde der Reaktorstandort im Dezember 1992 genehmigt.

In der Zwischenzeit wurde mit dem grundlegenden Entwurf begonnen. Um einen einheitlichen Standard für die Erstellung und Überprüfung des Entwurfs zu haben, hielt sich INET an die 'Design Criteria for the HTR-10' und den 'Standard Content and Format of the Safety Analysis Report of the HTR-10'. Beide Standards wurden von der National Nuclear Safety Administration im September 1992 bzw. im März 1993 genehmigt. Nach Fertigstellung der Grundkonstruktion des HTR-10 beauftragte INET Siemens/Interatom, die Grundkonstruktion unseres HTR-10 zu überprüfen. Diese Überprüfung sollte auf den Erfahrungen beruhen, die in Deutschland mit dem Bau und Betrieb des HTGR gemacht wurden. Wir hätten auch Zugang zu dem Wissen, das die Siemens/Interatom-Teams bei der fortgeschrittenen Entwicklung des HTR-Moduls gewonnen haben. Die Siemens/Interatom-Überprüfung wurde im August 1994 abgeschlossen. Siemens/Interatom machten viele produktive Anmerkungen und Vorschläge, die für die detaillierte Auslegung und den Bau des HTR-10 besonders wertvoll waren. INET arbeitete daraufhin mit anderen akademischen Instituten in China zusammen und begann mit dem detaillierten Entwurf des HTR-10. Das Architekturinstitut der Tsinghua-Universität war für den Entwurf des Gebäudes verantwortlich, in dem der Reaktor untergebracht werden sollte. Das Nuclear Power Institute of China erstellte den Entwurf für das Heliumreinigungssystem. Die chinesische Electric Power Technology Import and Export Corporation war für den Entwurf der Stromumwandlungsanlage verantwortlich. Zusätzlich zu den oben genannten Ausrüstungen und Teilen wurde die Konstruktion aller übrigen Systeme und deren allgemeine Umsetzung von verschiedenen Teams des INET durchgeführt.

Das Genehmigungsverfahren für den HTR-10 entspricht dem Verfahren, das auch für andere Kernreaktoren in China gilt. Es besteht im Allgemeinen aus zwei Schritten: (1) Erteilung der Baugenehmigung und (2) Erteilung der Inbetriebnahmegenehmigung. INET erstellte erneut einen vorläufigen Sicherheitsanalysebericht für den Antrag auf Baugenehmigung und reichte diesen Bericht im Dezember 1993 bei der Nationalen Behörde für nukleare Sicherheit ein. Die Arbeiten im Zusammenhang mit der Genehmigung des HTR-10 dauerten ein Jahr lang. Nachdem die Nationale Umweltschutzbehörde im September 1994 den Umweltverträglichkeitsbericht für den HTR-10 zur Beantragung der Baugenehmigung genehmigt hatte, erteilte die Nationale Behörde für nukleare Sicherheit im Dezember 1994 formell die Baugenehmigung.

Der erste Betonbehälter für das Reaktorgebäude wurde am 14. Juni 1995 gegossen. Der Bau des nuklearen Inselgebäudes wurde im Oktober 1997 abgeschlossen. Das konventionelle Inselgebäude wurde im Jahr 1999 fertiggestellt.

Zu den Hauptkomponenten des HTR-10 gehören der Reaktordruckbehälter, der

Dampferzeugerdruckbehälter, der Dampferzeuger, der Heißgasleitungsdruckbehälter, das Reaktorrinnere, die Steuerstabantriebsvorrichtung und der Heliumkreislauf. Alle diese Komponenten wurden von verschiedenen Unternehmen in Shanghai hergestellt. Drei Druckbehälter und der Dampferzeuger wurden im November 1998 in den Primärhohlraum des HTR-10 eingebaut. Der Einbau der metallischen und keramischen Reaktoreinbauten wurde im Dezember 1999 abgeschlossen. Die Installation des Steuerstabsystems, des kleinen Absorberkugelsystems, des Brennstoffhandhabungssystems, des Heliumzirkulators und der Energieumwandlungseinheit wurde im Mai 2000 abgeschlossen. Die Prüfung auf Luftleckagen im Primärkreislauf wurde im August 2000 durchgeführt. Die Leckagerate ist geringer als die technische Spezifikation. Im Oktober 2000 wurden Tests vor dem Betrieb des Primärkreislaufs und der Hilfssysteme unter kalten Bedingungen, ein Leistungstest der Stromversorgungssysteme sowie Tests der Instrumentierungs- und Kontrollsysteme abgeschlossen.

Der endgültige Bericht über die Sicherheitsanalyse und der Bericht über die Umweltauswirkungen zur Beantragung der Inbetriebnahmegenehmigung wurden im Oktober 1999 bei der National Nuclear Safety Administration bzw. der National Environmental Protection Administration eingereicht. Der abschließende Sicherheitsanalysebericht wurde genehmigt, und die Genehmigung für die Inbetriebnahme wurde im November 2000 von der National Nuclear Safety Administration erteilt.

Die erste Kernbeladung begann am 21. November 2000. Der HTR-10 erreichte am 1. Dezember 2000 die Vorkritikalität (intern und nicht angekündigt). Am 21. Dezember 2000 erreichte der HTR-10 die erste Kritikalität und gab diese offiziell bekannt.

### 3. Technische Versuche am HTR-10

Der HTR-10 weist die gleichen oder ähnliche Konstruktionsmerkmale wie das HTR-Modul auf. Bei der Konstruktion des HTR-10 wurden einige Unterschiede zum HTR-Modul gemacht, um die chinesischen Konstruktionsanforderungen zu erfüllen. So besteht der Dampferzeuger aus einer Reihe modularer Spiralrohre mit kleinem Durchmesser, im Brennstoffhandhabungssystem wird ein pneumatischer Impulsabwurf verwendet, und die Steuerstäbe werden von Schrittmotoren angetrieben. Diese Unterschiede würden bei unserem Entwurf zu Problemen führen. Es ist von entscheidender Bedeutung, technische Experimente durchzuführen, die die Eignung dieser neuen und/oder geänderten Komponenten belegen. Daher wurde im INET ein Programm von technischen Experimenten zur Prüfung der acht HTR-10-Schlüsseltechnologien durchgeführt (Xu et al., 1997). Das Hauptziel dieser technischen Experimente war es, die Konstruktionsmerkmale und die Leistung der Komponenten und Systeme zu überprüfen und Informationen über die Konstruktion und die Betriebserfahrung des HTR-10 zu sammeln.

Diese technischen Experimente umfassten:

1. ein Heißgaskanalleistungstest
2. die Messung des Temperaturgemischs am Kernboden
3. eine Prüfung der Stabilität der Zweiphasenströmung für den Durchlaufdampferzeuger
4. einen Leistungstest für das pulsierende pneumatische Brennstoffhandhabungssystem
5. einen Leistungstest des Steuerstabantriebsmechanismus
6. einen Validierungs- und Verifizierungstest für die digitalen Reaktorvollschutzsysteme
7. einen Test zur Messung des Neutronenabsorptionsquerschnitts des Reflektorgraphits
8. ein Leistungstest für den Heliumzirkulator



#### 4.1. Leistungsprüfung des Heißgaskanals

Der Aufbau des Heißgaskanals des HTR-10 ähnelt dem Aufbau des HTR-Moduls. Diese Struktur besteht aus einem Innenrohr, einem Außenrohr, einer Isolierschicht und Korundsteinen usw. Das Außenrohr dient als Trägerstruktur für das Innenrohr und die Isolierschicht. Beide Enden des Außenrohrs sind mit den Wellrohren verschweißt, um die Wärmeausdehnung zu absorbieren. Der Heißgaskanal ist zur einfacheren Installation in fünf Abschnitte unterteilt. Jeder Abschnitt wurde durch eine Schieberverbindung miteinander verbunden. Zwischen den beiden Innenrohren wurden Korundsteine als Isoliermaterial verwendet, die am Außenrohr befestigt wurden.

Bei einem Druckabfall würde der Druck in der Isolierschicht nur über den Abluftbereich in den Schieberverbindungen zwischen den beiden Innenrohren des Heißgaskanals entweichen. Der Druckunterschied zwischen der Isolierschicht und dem äußeren Innenrohr würde aufgrund des Geschwindigkeitsunterschieds der Heliumgasströmung in der Isolierung und im inneren Innenrohr während eines Druckentlastungsunfalls bestehen. Dieser Druckunterschied kann zu einer Beschädigung des Innenrohrs führen. Um dieses Problem zu lösen, untersuchten wir die Auswirkungen der Druckentlastungsrate und der Abgasfläche in den Gleitfugen auf die Druckdifferenz. Das Experiment wurde mit Luft bei einem Druck von 0,8 MPa, mit Stickstoff bei einem Druck von 1,0 und 3,0 MPa und mit Helium bei einem Druck von 0,8 MPa durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen:

1. die maximale Druckdifferenz steigt mit einer Erhöhung der Druckentlastungsrate
2. die maximale Druckdifferenz erhöht sich mit einer Verringerung der Abgasfläche in den Gleitfugen
3. es gibt einen kritischen Bereich für die Entlüftung in den Schieberfugen, d. h. die maximale Druckdifferenz würde schnell ansteigen, wenn die Entlüftungsfläche in den Schieberfugen kleiner als dieser kritische Bereich wäre. Dieser kritische Bereich hängt auch mit der Druckentlastungsrate zusammen

4. Bei gleicher Druckentlastungsrate und gleicher Abgasfläche in den Schieberstößen ist der maximale Druckunterschied in einer Heliumatmosphäre geringer als in einer Stickstoffatmosphäre.

Bei einem Druckentlastungsunfall im HTR-10 beträgt die maximale Druckentlastungsrate 0,025 MPa/s, und die minimale Auslassfläche in den Schieberverbindungen entspricht einer Fläche von 25 mm<sup>2</sup>. Die maximale Druckdifferenz würde 0,72 MPa für Stickstoffatmosphäre und 0,17 MPa für Heliumatmosphäre betragen. Auf der Grundlage dieser Berechnungen kann die Integrität des Heißgaskanals unter diesen Bedingungen aufrechterhalten werden.

Bei INET wurde eine Helium-Testkreislauf installiert, um die Techniken und Erfahrungen bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb eines Heliumsystems zu beherrschen und eine Einrichtung für die Forschung und Entwicklung dieser Heliumtechnik unter Verwendung der Heliumkomponenten zu schaffen.

Der Heißgaskanal wurde unter Betriebsbedingungen im Helium-Testkreislauf getestet. Der Aufbau der Heißgaskanal-Teststrecke ist derselbe wie die reale Strecke im HTR-10. Die einzige Ausnahme besteht darin, dass die Länge des Heißgaskanal-Testabschnitts kürzer ist als die Länge desselben Abschnitts im HTR-10. Dieser Längenunterschied ist notwendig, um die Anforderungen an die Teststrecke zu erfüllen. Die effektive Wärmeleitfähigkeit der

Isolationsschicht wurde bei einem Heliumdruck von 3,0, 2,5 und 1,5 MPa gemessen. Die empirische Gleichung für die effektive Wärmeleitfähigkeit lautet  $A_{eff} = 0,3512 + 0,0003T$  Wm<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, wobei T die durchschnittliche Temperatur der Dämmschicht in °C ist. Darüber hinaus wurde die Heißgas-Kanalprüfstrecke 258 Stunden lang bei einer Temperatur von über 700 °C und einem Druck von 3,0 MPa betrieben. Derselbe Heißgas-Kanalprüfabschnitt wurde 98 Stunden lang bei einer Temperatur von 950 °C und einem Druck von 3,0 MPa betrieben, wobei die Temperatur 18 Mal zwischen 100 und 900 °C und der Druck 20 Mal zwischen atmosphärischem Druck und 3,4 MPa gewechselt wurde. Wir konnten keine Verschlechterung der thermischen Leistung feststellen. Die strukturelle Integration des Heißgaskanals wurde nicht beeinträchtigt.

#### 4.2. *Messung des Temperaturmischungsgrades am Kernboden*

Am Kernboden herrschte eine ungleichmäßige Heliumtemperaturverteilung und die Heliumtemperaturdifferenz war aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung des Neutronenflusses und der Strömung groß. Um thermische Auswirkungen auf die Oberfläche der Dampferzeugerrohre zu vermeiden, ist es notwendig, das Heliumtemperaturgemisch zu kontrollieren, bevor das Helium in den Dampferzeuger eintritt. Die Heliumtemperaturmischung wurde durch die Konstruktion einer speziellen Struktur unterhalb des Kernbodens erreicht. Um den Temperaturmischungsgrad zu bestimmen und die Konstruktion dieser speziellen Struktur zu bewerten, wurde eine Testvorrichtung im Maßstab 1:1,5 gebaut. Ein ähnliches Kriterium wurde für die Gestaltung der Teststrecke angewandt. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass der Temperaturdurchmischungsgrad mehr als 94 % beträgt und die strengen Konstruktionsanforderungen erfüllt werden.

#### 4.3. *Ein Test der Zweiphasenströmungsstabilität des Durchlaufdampferzeugers*

Der Dampferzeuger für den HTR-10 besteht aus 30 spiralförmigen Rohren mit kleinem Windungsradius. Diese könnten sich anders verhalten als die üblichen spiralförmigen Wärmetauscher mit größerem Windungsradius. Um die Leistung der Wendelrohre mit kleinerem Windungsradius zu bestimmen, wurde am INET eine technische Versuchsanlage eingerichtet, die an den Helium-Testkreislauf angeschlossen ist. Die wichtigsten Forschungsziele waren (1) die Untersuchung der Strömungsstabilität des HTR-10-Dampferzeugers unter Betriebsbedingungen, (2) die Bestimmung des maximalen Drosseldurchmessers, (3) die Untersuchung des wasserseitigen Strömungswiderstands und (4) die Bestimmung des durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten des Dampferzeugers unter Verwendung der Wendelrohre mit kleinerem Windungsradius. Die Teststrecke besteht aus zwei Wendelrohren mit kleinem Windungsradius, deren Größe mit der des HTR-10 übereinstimmt. In der Teststrecke überträgt Helium Wärme auf das Wasser im Primärkreislauf, genau wie im HTR-10-Dampferzeuger. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Durchfluss bei 30 % der Gesamtleistung des HTR-10-Dampferzeugers bei einem Ausgangsdampfdruck von 2,5 bis 4,4 MPa mit einer Eingangswassertemperatur von 75 bis 180 °C und einem Druckabfall der Eingangsdrosselblende von mehr als 40 kPa stabil sein kann. Die experimentellen Ergebnisse für den Drosseldurchmesser der Drosselklappe und den durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten des Dampferzeugers bei Verwendung der Wendelrohre mit kleinerem Windungsradius stimmen mit den Ergebnissen unserer Berechnungen überein.

#### 4.4. *Leistungstest für das pulsierende pneumatische Brennstofffördersystem*

Zur Vermeidung von Betriebs- und Wartungsproblemen, die durch die Verwendung

mechanischer Einrichtungen verursacht werden, wurde von einem Team bei INET ein neues Brenn-stofffördersystem entwickelt. Dieses neue Brennstoffhandhabungssystem zeichnet sich durch eine pneumatische Impulsentladung aus, d.h. eine kugelförmige Kugel, die durch eine pneumatische Impulskraft aus einem Entladungsrohr entladen wird, anstelle des normalen mechanischen Einzelverschlusses (als Reduzierstück bezeichnet). Der Test im kalten Zustand, bei Raumtemperatur und Luftatmosphäre, wurde abgeschlossen. Das Hauptziel dieses Tests war es, die Durchführbarkeit des Konstruktionskonzepts für die pneumatische Impulsentladung zu zeigen. Mehr als 100 000 dieser Kugeln wurden mit der pneumatischen Impulsentladung entladen. Nach Abschluss des Kältetests wurde eine Anlage in Originalgröße installiert, um das gesamte Brennstoffhandhabungssystem mit seinen Komponenten bei Reaktortemperatur und niedrigem Heliumdruck zu testen. Die Hauptkomponenten in dieser Apparatur waren die gleichen wie im HTR-10. Der Vollmaßstabsapparat besteht aus einem Entladungsrohr, einem Reduzierstück, einem defekten Kugelseparator, einem Elevator, Graphitkugeldetektoren, Druckminderungsventilen, Einstellventilen, Heizungen usw. Das Helium-Hilfssystem des Geräts besteht aus einem Heliumkompressor, Heliumvorratsbehältern, Luftkühlern, Filtern, Vakuumpumpen usw. Die programmierbare Logiksteuerung wird für die automatische Steuerung verwendet, Mosaik-Simulationspaneele für die Simulation der Anzeige, und Computer für die Datenverwaltung. Die Leistungsprüfung des pulsierenden pneumatischen Kraftstofffördersystems wurde bei Temperaturen von 150-180 °C und einem Heliumdruck von 0,1 MPa durchgeführt. Mehr als 25 000 Kugeln, darunter auch einige zerbrochene Kugeln, wurden mit Hilfe des pulsierenden pneumatischen Brennstofffördersystems entladen. Das gesamte System wurde erfolgreich betrieben. Die Ergebnisse dieses Experiments zeigten uns, dass eine Kugel problemlos aus dem Entladungsrohr fallen gelassen werden kann, so dass das gesamte System die Konstruktionsanforderungen erfüllen kann.

#### 4.5. *Leistungsprüfung des Antriebsmechanismus der Steuerstangen*

Der Steuerstabantriebsmechanismus besteht aus einem Schrittmotor, einem Getriebe, einem Kettenrad, einem Geschwindigkeitsbegrenzungsanzeiger, einem Positionsanzeiger für den Steuerstab und dem Gehäuse. Die Leistungsprüfung des Steuerstabantriebs wurde mit dem Gerät in Originalgröße bei einer Betriebstemperatur von 150 °C und niedrigem Heliumdruck durchgeführt. Mit diesem Gerät wurden die folgenden Tests durchgeführt: Steuerstabbewegung, maximale Fallgeschwindigkeit des Steuerstabs, Positionsmessung und Lebensdauernachweis. Der Fall bei normaler Fallgeschwindigkeit wurde 2000 Mal und der Fall bei hoher Geschwindigkeit durch die Schwerkraft 500 Mal getestet. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Leistung den Konstruktionsanforderungen entspricht. Darüber hinaus wurde auch ein seismischer Test für die Steuerstangenantriebsvorrichtung durchgeführt. Der seismische Test wurde unter sechs verschiedenen Bedingungen durchgeführt, darunter der Betrieb unter einfachen Erdbebenbedingungen und die Sicherheitsabschaltung unter Erdbebenbedingungen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Steuerstange unter den vorgesehenen Erdbebenbedingungen normal bewegt und sicher abgelassen werden kann.

#### 4.6. *Validierung und Verifizierung des volldigitalen Reaktorschutzsystems*

Das Reaktorschutzsystem für den HTR-10 ist ein volldigitales System. INET erfüllte das Auslegungskriterium für ein volldigitales Reaktorschutzsystem, entwarf den logischen Kreislauf und

entwickelte das Validierungs- und Verifizierungsverfahren (V&V). Für das V&V wurde ein Reaktorschutzsystem in Originalgröße installiert und getestet. INET entwickelte auch ein automatisches Messprüfgerät für das Reaktorschutzsystem. Das Reaktorschutzsystem wurde mit Hilfe dieses Geräts 863 Stunden lang erfolgreich getestet. Der Betrieb des HTR-10 zeigt, dass der Entwurf und die Installation des vollständigen digitalen Reaktorschutzes erfolgreich ist.

#### 4.7. *Messung des Neutronenabsorptionsquerschnitts des Reflektorgraphits*

Da die Herstellung von isotropem Großgraphit in China schwierig ist, wurde der Graphit für die HTR-10-Reflektoren von Toyo Tanso Co. aus Japan importiert. Gemäß der technischen Spezifikation des Unternehmens für IG-11-Graphit beträgt der Gesamtaschegehalt höchstens 800 ppm, aber es gibt keine Spezifikation für den Neutronenabsorptionsquerschnitt. Bekanntlich ist der Neutronenabsorptionsquerschnitt einer der kritischsten Parameter. Für Kritikalitätsberechnungen ermöglichen Erfahrungswerte genauere Vorhersagen. Um den Parameter zu erhalten, wurde die Methode der Messung der Diffusionslänge des Graphits an der mit IG-11 gepackten Graphitsäule gewählt. Dadurch konnte die Bearbeitung des Graphits, das für den HTR-10 verwendet werden sollte, vermieden werden. Ein Gesamtgewicht von 25 000 kg Graphit wurde in eine Säule von  $188,4 \times 187,1 \times 400 \text{ cm}^3$  gepackt. Eine Am-Be-Neutronenquelle und BF<sub>3</sub>-Neutronenzähler wurden zur Messung der Verteilung des thermischen Neutronenflusses in Achsenrichtung verwendet. Das experimentelle Ergebnis zeigte, dass der gesamte äquivalente Neutronenabsorptionsquerschnitt 1,9-mal höher ist als der von Graphit in Nuklearqualität. Dies führt nur zu einer Erhöhung der anfänglichen Uranbelastung und hat keinen Einfluss auf weitere Anwendungen des HTR-10.

#### 4.8. *Leistungstest für den Heliumzirkulator*

Der Heliumzirkulator für den HTR-10 wurde gemeinsam von Shanghai Blower Works und Shanghai Xian-Feng Electric Manufacturing Works entwickelt und hergestellt. Der Heliumzirkulator für den HTR-10 ist ein zentrifugaler vertikaler Typ. Um den Betrieb zu vereinfachen, wurden normal geschmierte Axial- und Radiallager gewählt. Der Heliumzirkulator befindet sich oberhalb des Dampferzeugers. Der Heliumzirkulator besteht aus einer elektrischen Stator- und Rotorbaugruppe, internen Stützen, Axial- und Radiallagern, einer Laufradeinheit sowie einer Vorrichtung zur Messung der Lagertemperatur und der Schwingungen der Achse. Alle Teile des Heliumzirkulators sind im Druckbehälter des Dampferzeugers untergebracht, so dass kein primäres Heliumgas in die Atmosphäre entweichen kann. Ein Motor mit variabler Drehzahl und Frequenzumrichter steuert die Durchflussmenge des primären Heliumgases. Der Heliumzirkulator wurde 100 Stunden lang kontinuierlich bei 250 °C und einem Druck von 0,236 MPa Stickstoffatmosphäre betrieben, um die Betriebsbedingungen des HTR-10 anhand von Ähnlichkeitskriterien zu simulieren. Die Kennlinie des Heliumzirkulators wurde gemessen. Der Heliumzirkulator wurde außerdem 100 Stunden lang kontinuierlich bei 250 °C und einem Druck von 0,1 MPa in Heliumatmosphäre betrieben, um den Einfluss der Heliumatmosphäre auf die Betriebsfähigkeit zu untersuchen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das Verhalten des Heliumzirkulators die Konstruktionsanforderungen der technischen Spezifikation erfüllt.

## **5. Erfahrungen aus dem Bau des HTR-10**

Bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb des HTR-10 wurden viele Erkenntnisse und Erfahrungen gewonnen. Diese Erkenntnisse werden in die Auslegung der großen Prototypanlagen einfließen. Vor allem aber wurde der Vorteil des HTR-Moduls durch den Bau des HTR-10 immer deutlicher. Es besteht kein Zweifel, dass das HTR-Modul sowohl inhärent sicher als auch wirtschaftlich wettbewerbsfähig ist. Wir haben gelernt:

(1) Es ist möglich, ein HTR-Modul in kurzer Zeit zu bauen. Der Bau des HTR-10 dauerte etwa 5 Jahre vom Gießen des ersten Betons bis zum Erreichen der Kritikalität. Diese Bauzeit könnte in Zukunft verkürzt werden. Verzögerungen bei der Konstruktion verlängerten die Bauzeit erheblich. Tatsächlich dauerte die Installation aller Komponenten und Systeme nur etwa 1 Jahr, und auch die Tiefbauarbeiten nahmen nur etwa 1 Jahr in Anspruch. Die Installationszeit des Graphitreaktor-Innensystems betrug beispielsweise nur 4 Monate, da wir vor dem endgültigen Einbau in den Reaktordruckbehälter eine Vorinstallation in der Werkstatt durchführten. Darüber hinaus ist es auch möglich, die Installation von Systemen in einem kurzen Zeitraum abzuschließen, da die Systeme des HTR-10 einfach sind. Der Einsatz eines volldigitalen Reaktorschutz- und -leitsystems kann die Zeit vor Inbetriebnahme ebenfalls verkürzen.

(2) Das System des HTR-Moduls ist einfach und kann modular hergestellt werden. Die einzigen beiden Systeme, die vom Standpunkt der Systemanordnung, der Anzahl der Systemkomponenten und des Komponentenbedarfs aus gesehen etwas komplex sind, sind das Brennstoffhandhabungssystem und das Heliumreinigungssystem neben dem Primärkreislauf. Die anderen Systeme sind sehr konventionell und einfach zu installieren.

(3) Die Klassifizierung aller Komponenten und Systeme sollte neu überdacht werden, da die Klassifizierung der Komponenten und Systeme für den HTR-10 während der Entwurfsphase hauptsächlich auf der Klassifizierung von Leichtwasserreaktoren basierte. Zum Beispiel ist die Sicherheitsfunktion des Heliumzirkulators für den HTR-10 nicht die gleiche wie die Sicherheitsfunktion der Primärpumpe für einen Leichtwasserreaktor.

(4) Um die Entwicklung des HTGR weltweit zu fördern, ist eine enge internationale Zusammenarbeit erforderlich. Die internationale Unterstützung und Hilfe hat den Bau des HTR-10 beschleunigt. Ohne internationale Unterstützung, insbesondere von deutschen Unternehmen und Instituten, hätte das INET die Kritikalität im Jahr 2000 nicht erreichen können. Es sollte nicht vergessen werden, dass die HTGR-Entwicklung nicht mit der Entwicklung anderer Reaktoren vergleichbar ist. Die Aussicht auf die Entwicklung des HTGR wäre ungewiss, wenn die Entwicklung nicht in internationaler Zusammenarbeit durchgeführt werden könnte.

## **5. Schlußfolgerung**

Es ist unvermeidlich, dass die Kernenergie die fossile Energie teilweise ersetzen wird, um den Energiebedarf zu decken und die Umweltverschmutzungsprobleme zu minimieren. Aufgrund der Vorteile der inhärenten Sicherheit, der Einfachheit des Systems und der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit hat der modulare HTGR eine große Zukunft. Wenn wir auf die HTGR-

Entwicklung über einen Zeitraum von fast 30 Jahren zurückblicken, glauben wir, dass die Entwicklungsstrategie des modularen HTGR richtig und für die chinesischen Bedingungen geeignet ist. Die Kommerzialisierung des modularen HTGR wird in naher Zukunft in China unausweichlich sein.

### Referenzen

INET und KFA, 1988. High Temperature Reactor in Heavy Oil Recovery and Chemical Industry in the People's Republic of China, Final Report Summary, August 15, 1985 to December 31, 1988.

Lohnert, G.H., 1990. Technische Konstruktionsmerkmale und wesentliche sicherheitstechnische Eigenschaften des HTR-Moduls. Nucl. Eng. Konstruktion 121 (1990), 259-275.

Steinwarz, W., Xu, Y.H., 1990. Stand der Konstruktion des HTR-Testmoduls China. Nucl. Eng. Design 121 (1990), 317-324.

Sun, Y.L., Xu, Y.H., 2000. Licensing of the HTR-10 Test Reactor, Workshop on 'Safety and Licensing Aspects of Modular High Temperature Gas Reactors' Aix-en-Provence, Frankreich.

Wang, D. Z., 1982. Untersuchung eines Hochtemperaturreaktors mit einem Mittleren Graphitkugel-Bereich Jul-1809- RG 1982.10.

Xu, Y.H., Liu, J.G., Yao, M.S., Zhou, H.Z. Ju, H.M., 1997. Forschungseinrichtungen und Experimente im Bereich der Hochtemperaturtechnik in China. NEA Workshop on High Temperature Engineering Research Facilities and Experiments, Petten, The Netherlands.

Zhao, R.K., Yuan, K.Q., Shu, T.W., 2001. Projektfortschritt im Energiebereich. Atomic Energy Press, S. 121-206 auf Chinesisch.

Zhong, D.X., Gao, Z.Y., 1985. Study on modular high temperature gas-cooled reactor and its application for heavy oil recovery 1985.11 INET Report (auf Chinesisch)