

ロシアのナトリウム冷却高速炉(BN 600/BN 800)

概要 / 目的:

ロシアは世界のナトリウム冷却型高速炉(SFR)の開発をリードしています。ロシア及びソ連で建設されたBR-5/BR-10, BOR-60, BN-350, BN-600, BN-800の運転時間は計160炉年を超えており、これは世界のSFR運転経験の1/3を占めます。現在では試験炉BOR-60と産業炉BN-600, BN-800が運転中で、第4世代商用炉BN-1200の設計が進行中で、多目的研究高速炉(MBIR)も建設中です。SFRの技術成熟度及び実現可能性はBN-600の38年にわたる運転成功により実証されています。BN-800の主な目的はクローズド燃料サイクルの実証であり、BN-1200はLWRとの経済競争性、SFRの受動的安全系と固有安全特性による高い安全性を示すことです。本ウェビナーでは、BN-600及びBN-800の特徴、運転パラメータ(燃焼度、ロードファクター等)、ナトリウム漏えいなどの経験から得た知見などを紹介します。

講演者紹介:

Ilya Pakhomov 氏はロシア連邦科学センターのレイプンスキー物理電工学研究所(IPPE)の研究室長である。2006年より、技術者、若手研究者、及び研究室長として革新的ナトリウム高速炉の開発を担当してきた。2014年、IPPEのBN-800の科学技術支援ワーキンググループのメンバーとなった。現在、ナトリウム高速炉の安全実験工学管理研究室の室長である。炉心の運転要素、ナトリウム火災の安全課題、及びナトリウム/水蒸気発生器における内部漏洩の安全にかかる研究を担っている。また、ナトリウム高速炉のR&D計画の策定にも携わっている。



ロシアにおけるSFRの長い経験とBN-600の基本コンセプト:

SFR開発はソ連及びロシアにおいて60年以上続いており、複数のプロトタイプ炉、実験炉及び産業電力ユニットが運転されている。過去のSFRとBN-600の基本的違いは、一次冷却系のプール型配置である。BN-600は1980年から順調に稼働している。

Main Characteristics of the BN-600 Power Unit (1/2)

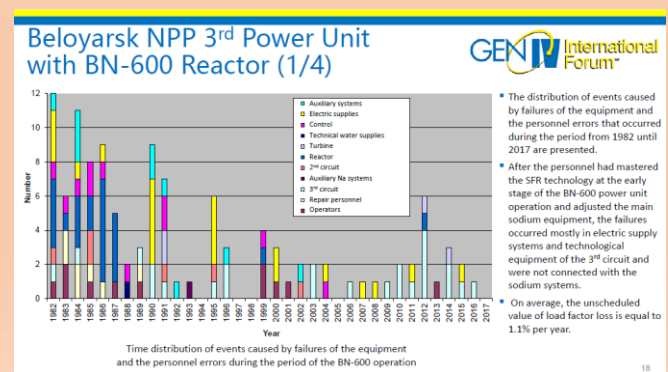
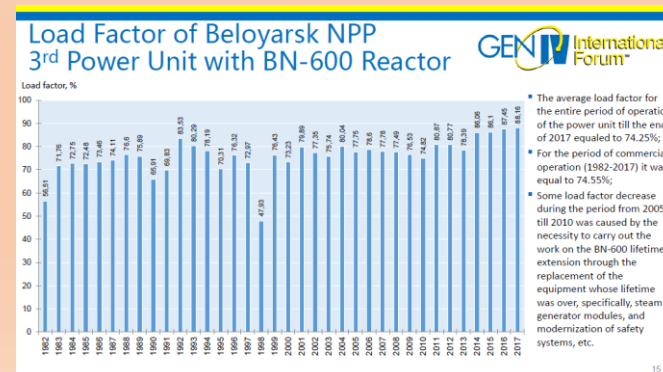
General parameters:	
Thermal power, MWth	1470
Electric power, MWe	600
Number of circuits	3 (primary and secondary circuits - sodium, 3 circuit - steam-water)
Design lifetime, year	30 (extended to 40)
Primary circuit:	
Arrangement	Pool-type
Reactor vessel support	At the bottom
Vessel cooling agent	Cold sodium
Number of heat removal loops	3
Sodium temperature at core inlet/outlet, °C	377/550
Sodium flow rate, t/h	25000
Core and fuel:	
Fuel	Uranium dioxide pellets
Max. fuel burnup, % h.a.	11.1
Diameter, mm	2058
Height, mm	1030
Intermediate heat exchanger:	Shell-and-tube design, secondary sodium flowing on the tube side

Main Characteristics of The BN-600 Power Unit (2/2)

Primary pump:	Centrifugal, one stage
Rotating speed, rpm	250-970
Steam generator:	Once-through, section & modular, 8 sections (3x8=24 modules)
Inlet/outlet sodium temperature, °C	518/328
Inlet/outlet water/steam temperature, °C	241/507
Life steam pressure, MPa	14
Secondary pump:	Centrifugal, one stage
Rotating speed, rpm	250-750
Turbo generator:	Standard
Power, MW	210
Decay heat removal system:	
Primary and secondary circuits	Normal operation system. Bypass with AHX on loop №5 of secondary circuit
Third circuit	Steam generator-deaerator, emergency feedwater pumps
Refueling system:	2 rotating plugs, vertical refueling mechanism
Fuel transfer system:	Elevators with guide ramp
Spent fuel storage:	In-vessel storage, sodium and water pools
Washing of subassemblies from sodium:	Steam-gas-water

BN-600の炉心及び稼働率:

BN-600の燃焼度設計は炉心改修により徐々に拡張されてきた。順調な運転と研究は、最大11.1%の燃料燃焼度の設計価値上昇、及び長寿命燃料への転換(燃料交換期間4倍)を可能とした。2017年までの平均稼働率は74.25%であり、1982-2004年の間、稼働率は予定された修繕のため徐々に低下した。全体の3%だけが機材故障又は人的ミスに依るものである。故障の多くは電力供給システム及び3次系の技術機械において起こった。SFRの運転期間は冷却システムと使用された構造材料の互換性の良さと低腐食性を証明した。



ナトリウム漏洩:

外部及び蒸気発生系内部へのナトリウム漏洩は、運転初期の段階に起こった。27回のナトリウム漏洩が検知され、そのうち14回はナトリウム火災があった。蓄積された漏洩経験は防護システムの効果性を高め、この24年間はナトリウム漏洩は起きていない。

蒸気発生器は高い性能特性を示し、運転初期段階の17回の漏洩を除き、この27年間系内部への漏洩なく運転している。

Beloyarsk NPP 3rd Power Unit with BN-600 Reactor (3/4)

The main characteristics of large sodium leaks at BN-600

Date of leak	Place of leak	Detection method	Causes	Amount of sodium leaked
13.01.80	Sodium reception system	Ionization smoke detector	Defects of flange joints	50 kg
11.08.81	SG valve seal	Electric heating control, ionization detectors	Defects of flange joints	300 kg
02.07.82	SG valve seal	Personnel visual inspection	Defects of flange joints	30 kg
31.12.90	SG drainage line	Electric heating	Manufacture defects	600 kg
07.10.93	Primary sodium purification system	Electric heating, radioactive aerosol detection	Insufficient homing action of pipelines	1000 kg
06.05.94	Drainage line of intermediate heat exchanger	Personnel visual inspection	Cutting the pipe before sodium freezing	650 kg

- All 27 sodium leaks that occurred at the early stage of the BN-600 reactor operation were mostly small leaks:
 - In 21 leaks the amount of sodium leaked didn't exceed 10 L (from 0.1 to 10 L).
- In 6 other leaks the amount of sodium leaked was 30, 50, 300, 600, 650 and 1000 L.

The experience in sodium leaks outside and inter-circuit leaks in SG was gained at the early stage of the BN-600 operation (when the personnel mastered the SFR technology, tested and optimized the design solutions, adjusted operation modes, detected defects in manufacture of equipment.)

Characteristics of Intercircuit Leaks in BN-600 Power Unit SG Modules

Parameters at the time of leak	No. of leak											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Module	RH	SH	RH	SH	SH	SH	SH	SH	EV	RH	SH	RH
Date of leak	24.06.80	04.07.80	24.08.80	08.09.80	20.10.80	09.06.81	19.01.82	22.07.83	06.11.84	10.11.84	24.02.85	24.01.91
Leak rate, g/s	0.02-6	0.1-0.615	0.09-15	0.2-0.3	0.0064-0.23	140	250	-	0-3	0.02	0.14	4.6
Amount of water escaped into 2 circuit, kg	40	17.87	7	0.18	0.78	40	20.3	2.77	1.8	0.75	0.73	8.3

EV – Evaporator, SH – Superheater, RH – Reheater

Evaluating all the deviations from normal operating mode that took place during the BN-600 operation, including those connected with sodium leaks, it should be emphasized that none of them resulted in any radiation impact on the population and environment. By the off-site impact criteria, all of them are below the International Nuclear Event Scale, and, therefore, are insignificant.

BN-600の主要な結果:

BN-600の運転中、1474億kWh以上の電力供給に加え、多くの目標が達成された。最も重要な結果のひとつは、ナトリウム大型機器の運転期間及び寿命の設計パラメーターが達成可能又はそれ以上であった事である。BN-600の寿命は2010年に10年間延長され、2020年まで再延長するための活動が現在行われている。

Key Results of BN-600 Power Unit Operation (1/2)

- During the operation of the BN-600 power unit, the following goals were achieved:
 - Long-term endurance tests of large-size equipment operating in sodium.
 - Mastering the sodium technology on an industrial scale.
 - Development and optimization of operating modes.
 - Mastering the technology of replacement and repair of sodium equipment including the primary components (pumps, steam generators, intermediate heat exchangers, rotating plugs).
 - Reaching the acceptable level of fuel burnup.

Key Results of BN-600 Power Unit Operation (2/2)

- During the entire period of its operation (as of the end of 2017, 265 707 hours in critical state), BN-600 produced more than 147.4 billion kWh of electrical energy, making a notable contribution into the Urals power supply as one of the most cost-effective and eco-friendly power units:
 - Amount of gaseous radioactive products emission to the atmosphere, as a rule, does not exceed 1% of the acceptable level.
 - Amount of solid and liquid radioactive waste is also minimal, not exceeding 50 m³ per year.
 - Personnel radiation exposure is lower than the average level existing in the nuclear industry.
- One of the most important results obtained during the BN-600 operation is the fact that the design parameters for sodium large-scale equipment operation period and life time have been achieved and even exceeded.
- During the period of industrial operation the BN-600 reactor demonstrated high safety and reliability characteristics and thus solved its task which was to industrially justify the reliability and safety of the SFR technology and, specifically, the technology of sodium coolant.

BN-800の基本コンセプト:

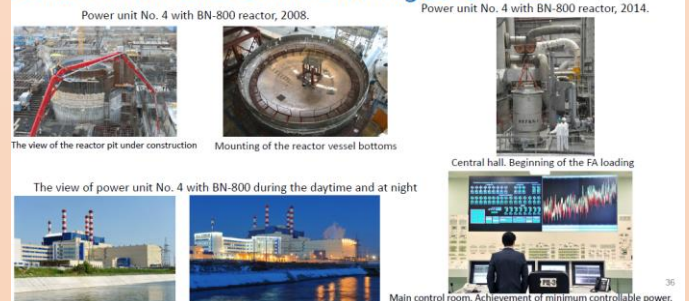
BN-800の主要な課題のひとつは、クローズド燃料サイクルの実証である。MOX及び濃縮ウラン燃料のハイブリッド炉心システムが用いられている。BN-800はBN-600設計を基に設計されたが安全システムを含め、いくつか新しいものを有している。BN-800は2017年末までに14543時間運転し、94億kWh発電した。

Principal Stages of BN-800 Construction and Commissioning (1/3)

- The BN-800 reactor design is to a significant extent a logical development of the BN-600 reactor and contains its main design, scientific and engineering solutions. Nevertheless, the BN-800 design has a number of conceptually new things that differ it from the BN-600 reactor.
- The principal differences are the following:
 - A passive emergency shut-down system with hydraulically suspended rods;
 - A special sodium cavity over the core to reduce sodium void reactivity effect;
 - A core catcher in the low part of the reactor vessel to collect and retain core debris under the conditions of heavy accidents;
 - A decay heat removal system dissipating heat outside through air heat exchangers connected to the secondary circuit at the SG by-pass;
 - One turbine generator for all the three heat-removal loops;
 - In SG sections a reheater module is eliminated (now it is steam reheating), so each SG section comprises an evaporator module and a primary superheater module.

34

Principal Stages of BN-800 Construction and Commissioning (3/3)



36

ロシアにおけるSFR開発の展望及び結語:

SFR技術の開発及び向上の将来の目的に従い、クローズド燃料サイクルの実証、SFR技術の商業化、及び大型SFR技術の実証が重要視される。

CONCLUSION



- The overview of the experience in operation of power units with BN-600 and BN-800 reactors and, particularly, the results of successful and stable operation of the third power unit at the Beloyask NPP, presented in these slides, makes it possible to draw a conclusion about the industrial development of SFR technology and, in particular, sodium technology.
- The experience gained in the course of BN-600 operation formed the basis for designing high-power sodium fast reactor BN-1200.

38