

Перспективы использования ионных пучков комплекса NICA для разработки современных систем ADSR

Михаэла Параипан

Рабочее совещание "Прикладные исследования на комплексе NICA: перспективы сотрудничества PCO-Алания – ОИЯИ", 17-19 июн. 2023, СОГУ им. К.Л. Хетагурова, г. Владикавказ

ADSR как источник энергии и способ трансмутации

Преимущества:

- реактор работает в подкритическом режиме – более безопасная эксплуатация
- более жесткий спектр нейтронов – лучшее сжигание актинидов

Почти обобщенное мнение состоит в том, что оптимальным пучком для ADSR является пучок протонов с энергией около 1 ГэВ.[1,2].

Факторы, влияющие на эффективность ADSR

Систематическое исследование условий, при которых достигается максимальный прирост энергии, обеспечивается высокое сжигание топлива и длительный период между перегрузками:

- факторы, связанные со структурой и составом активной зоны реактора
- тип частиц и энергия пучка
- тип ускорителя

Оптимизация активной зоны реактора

Были проанализированы некоторые аспекты, связанные с геометрией и составом активной зоны.

M. Paraipan, V. M. Javadova, S. I. Tyutyunnikov, *Aspects of target optimization for ADS with light ion beams at energies below 0.5 AGeV*, Progr. Nucl. En. 120 (2020) 103221

M. Paraipan, A. A. Baldin, E. G. Baldina, S. I. Tyutyunikov, *Conceptual Design of Accelerator Driven Systems with Light Ion Beams*, Nuovo Cimento 42 C (2019) 66

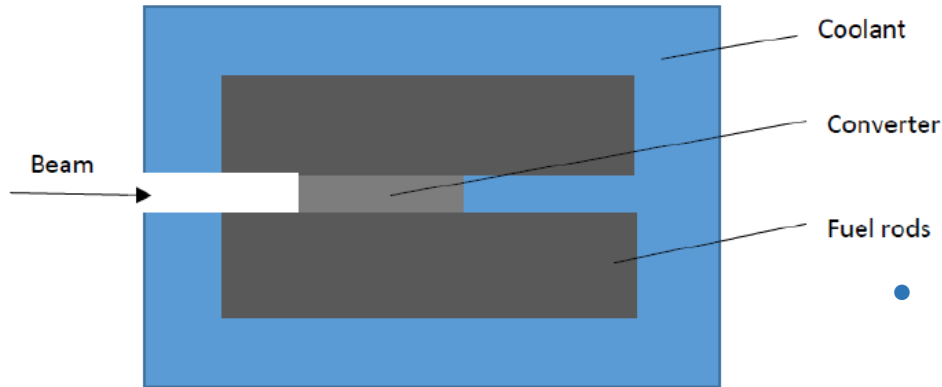


Схема реактора.

Активная зона представляет собой сборку твэлов, окружающих конвертор и погруженных в теплоноситель.

Состав топлива: металл (сплав U-Pu-Zr), карбид, оксид.
Охлаждение с помощью Pb, эвтектики Pb-Bi (LBE) и Na.

- **Изменение состава актинидов и охлаждение металлами сохраняют формы спектров нейтронов и соотношение между энергиями, выделяемыми различными ионами.**
- **Использование Pb или LBE предпочтительнее, поскольку они являются лучшими отражателями нейтронов, чем Na, уменьшают утечку нейтронов и позволяют реализовать необходимый k_{eff} при меньшем обогащении.**

Что касается активной зоны реактора, то для функционирования ADS наиболее важны три фактора:

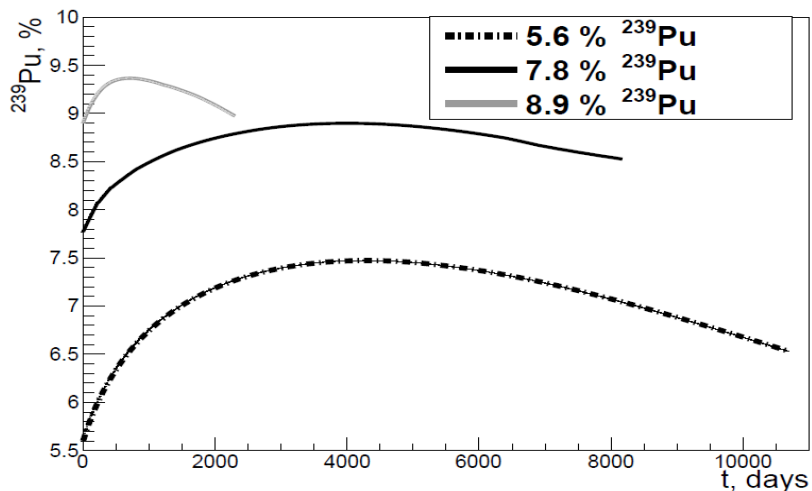
- материал, используемый для конвертора.
- уровень обогащения
- рабочее значение k_{eff} .

Выбор конвертера

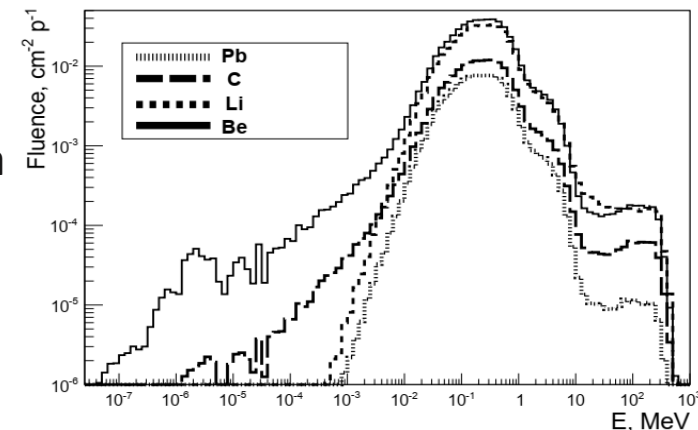
- Легкие материалы предпочтительнее, особенно для ионных пучков при низкой энергии[3].
- Наилучшие результаты получены с Be-конвертером. Помимо увеличения пробега ионов, Be действует как хороший замедлитель и отражатель нейтронов.
- Выделяемая энергия увеличивается с увеличением размеров конвертера.

Существенным преимуществом Be-конвертера больших размеров является то, что он позволяет снизить уровень обогащения, увеличить время работы без дозаправки и, как следствие, выгорание топлива.

Уровень обогащения



Эволюция ^{239}Pu в реакторах с 5.6%, 7.8% и 8.9% ^{239}Pu , облученные пучком ^7Li с энергией 0.25 АГэВ и интенсивностью $1.25 \cdot 10^{16}$.



Спектры нейтронов в бланкете с конвертерами Li, Be, C and Pb, облученными пучком ^7Li с энергией 0.3 АГэВ.

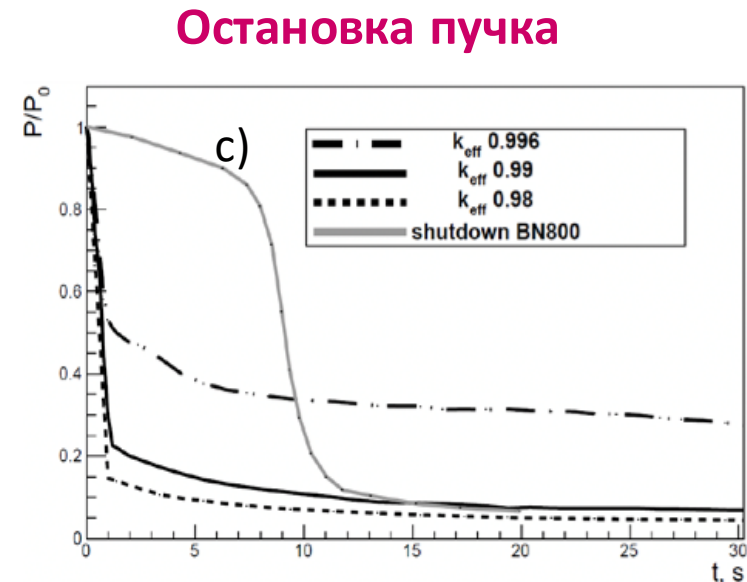
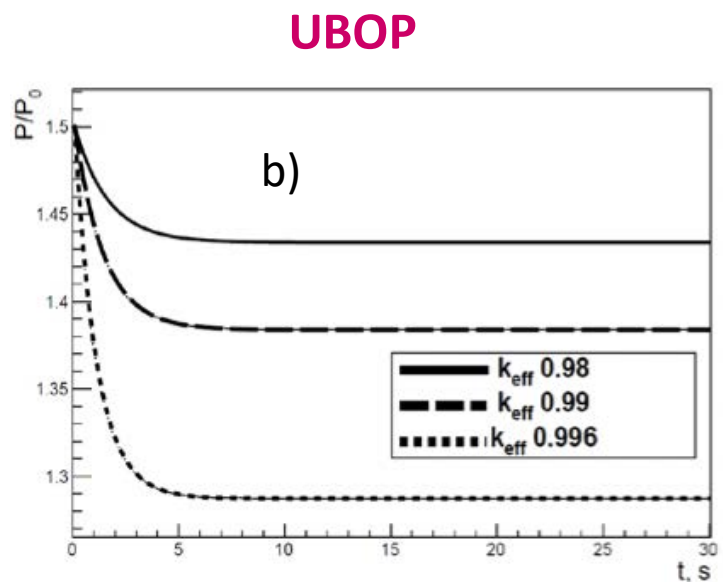
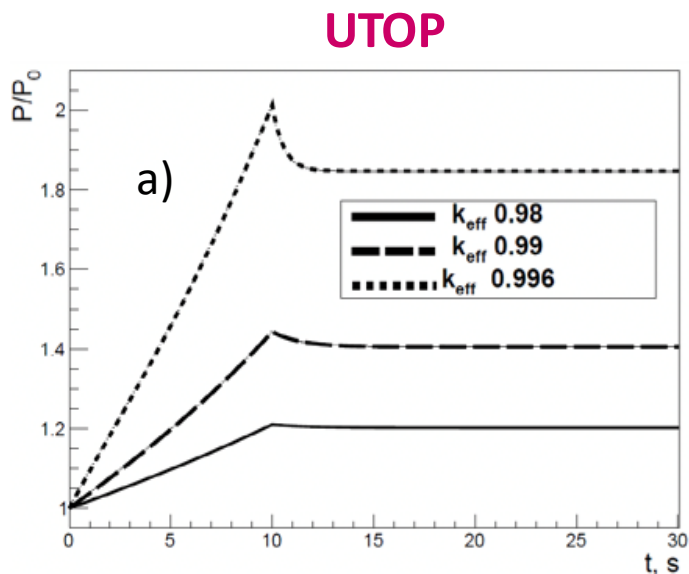
- активные зоны с металлическим топливом (U-Pu-10%wtZr), k_{eff} 0.988, но с разным обогащением, облученные пучком ^7Li с энергией 0.25 АГэВ и интенсивностью $1.25 \cdot 10^{16}$.
- Конвертер представляет собой Be-цилиндр радиусом 10 см и длиной 120 см.
- Тепловая мощность 550 МВт.

Более низкий уровень обогащения предпочтительнее, так как он обеспечивает более длительный период между дозаправками и более высокое сжигание актинидов.

При правильной конфигурации активной зоны топливо позволяет сжечь в АДСР до 25 % актинидов за один цикл по сравнению с 6-7 % в быстром реакторе.

Оптимальное значение k_{eff}

Оптимальное значение k_{eff} должно одновременно обеспечивать безопасную эксплуатацию и максимальный прирост энергии.



The power evolution in UТОР (a), in УВОР (b) transients and after the beam turn off (c) in ADS with U-Pu-10%Zr fuel and k_{eff} 0.98, 0.99, 0.996.

Значения k_{eff} ниже 0.99 выгодны с точки зрения развития переходного процесса УТОР.

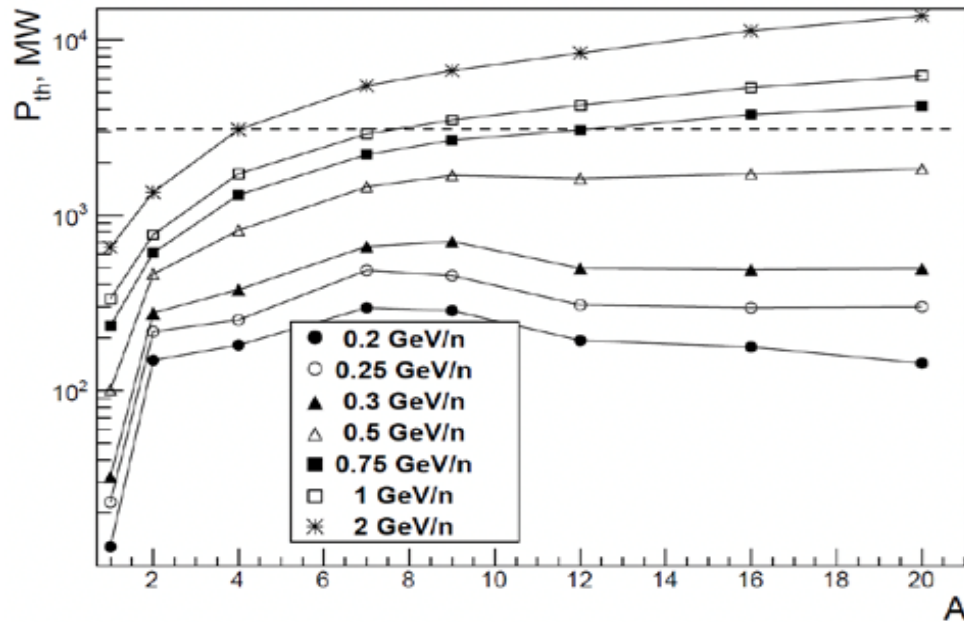
В случае переходного режима УВОР более высокое начальное значение k_{eff} является благоприятным, поскольку ведет к новому установившемуся режиму на уровне мощности, более близком к начальному.

С точки зрения быстрой остановки реактора после остановки пучка k_{eff} 0.99 достаточно безопасен.

Рабочее значение 0.988-0.99 для k_{eff} было бы достаточно безопасным.

Пучок и ускоритель

При моделировании использовалась активная зона, оптимизированная для ADSR (Be-конвертер длиной 110 см, k_{eff} 0.985). Активная зона облучалась пучками протонов и ионов от D до ^{20}Ne , энергиями от 0.2 АГэВ до 2 АГэВ и интенсивностью пучка $1.5 \cdot 10^{16}$.



Возможности системы по отводу тепла ограничивают максимальную тепловую мощность в ADSR примерно на уровне 3 ГВт. Значения выделяемой энергии, коррелированные с интенсивностью пучка, ограничивают максимальную энергию ионов, которую можно использовать в ADSR. В наших условиях мы можем ускорить ^7Li и ^9Be до ~ 1 АГэВ, а ^{16}O и ^{20}Ne на максимум 0.75 АГэВ.

Тепловая мощность в зависимости от массового числа и энергии иона.

Коэффициент прироста энергии G используется как мера энергоэффективности. Определяется как отношение вырабатываемой электрической мощности P_{prod} к мощности, затрачиваемой на ускорение пучка P_{spent} :

$$G = \frac{P_{\text{prod}}}{P_{\text{spent}}}$$

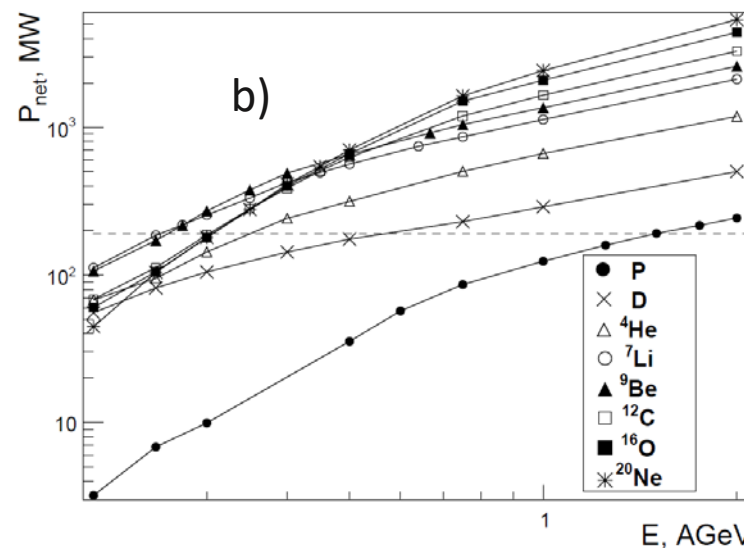
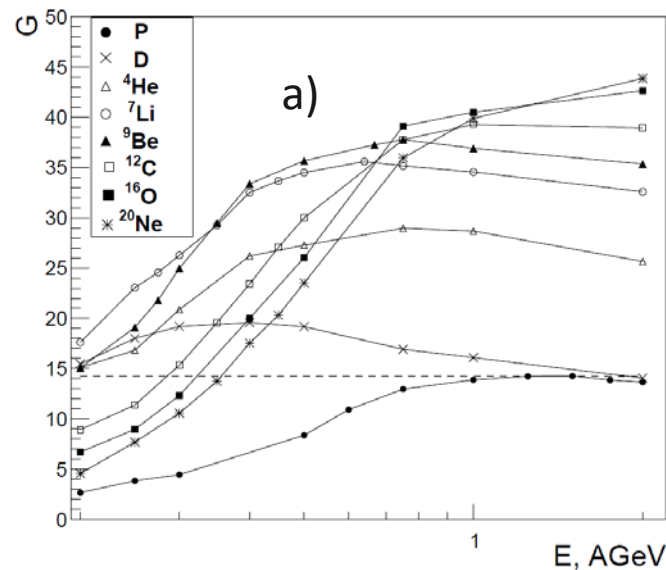
Линейный ускоритель

Мощный протонный пучок – эффективность ускорителя η_0 0.18 - 0.25 [10,11].

P_{spent} составляет всего несколько % от P_{prod} - влияние η_0 на P_{net} маленькое.

Использование K_{eff} 0.988 дает P_{net} на 25% выше.

Particle/ Energy, AGeV	K_{eff} 0.985				K_{eff} 0.988			
	η_0 0.18		η_0 0.25		η_0 0.18		η_0 0.25	
	G	P_{net} , MW	G	G	G	P_{net} , MW	G	P_{net} , MW
P 1.5	10.3	185.3	14.25	17.8	12.8	236.6	17.8	242.2
${}^7\text{Li}$ 0.25	18.3	183	23.05	28.8	22.9	231.4	28.8	233.6
${}^{12}\text{C}$ 0.75	32.2	37.8	47.2	40.3	1491.8	47.2	1497.4	

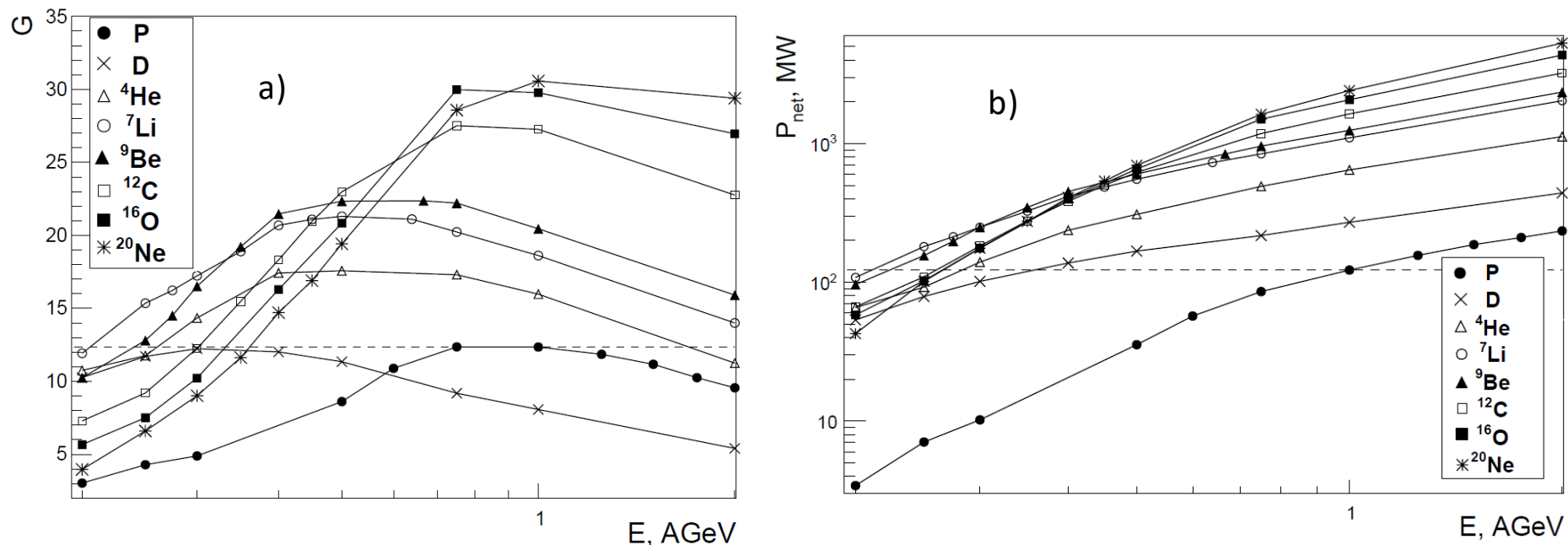


G (a) and P_{net} (b) as a function of projectile energy for particles accelerated in a linac, core with k_{eff} 0.985.

Пучок ${}^7\text{Li}$ 0.25 АГэВ реализует ту же P_{net} , что и пучок протонов 1.5 ГэВ при минимальной длине ускорителя (длина в 2.5 раза меньше, чем у протона).

Циклотрон

Значения G немного ниже, чем в линейном ускорителе, но P_{spent} составляет всего несколько процентов от P_{prod} и P_{net} почти такое же.



G (a) and P_{net} (b) as a function of projectile energy for particles accelerated in a cyclotron, core with k_{eff} 0.985.

Оптимальная энергия протонного пучка ~ 1 ГэВ с $G \sim 12$.

Пучок ^7Li с энергией 0.2 АГэВ эквивалентен протонному пучку с энергией 1 ГэВ по приросту энергии и полученной полезной мощности.

Ионные пучки, начиная с ^7Li и с энергией выше 0.3 АГэВ реализуют в 2-3 раза большую G .

Comparison with fusion power plants

ITER project – magnetic plasma confinement

G ~ 3

Table 1

Energy-related parameters of the DEMO2 fusion power plant reference model.

Fusion power	3255	MW
Thermal power ^a	4149	MW
Gross electric power	1660	MW
Net electric power	953	MW
Plant self-consumption ^b	707	MW
Plant availability fraction	75	%

^a The reactor thermal power includes the fusion power, the power released during a tritium breeding, and the reradiated heating power.

^b The self-consumption includes among others the plasma heating and current drive system.

Entler S., Horacek J., Dlouhy T., Doctal V.,
Approximation of the economy of fusion
energy, Energy 152 (2018) 489-497

LIFE project – laser inertial plasma confinement

G ~ 4

Table 1

LIFE plant parameters.

Conversion efficiency, %	45	47
Gross power, MWe	595	1217
Laser electrical power input, MWe	124	248
In-plant power load, MWe	34	64
Net electric power, MWe	437	905

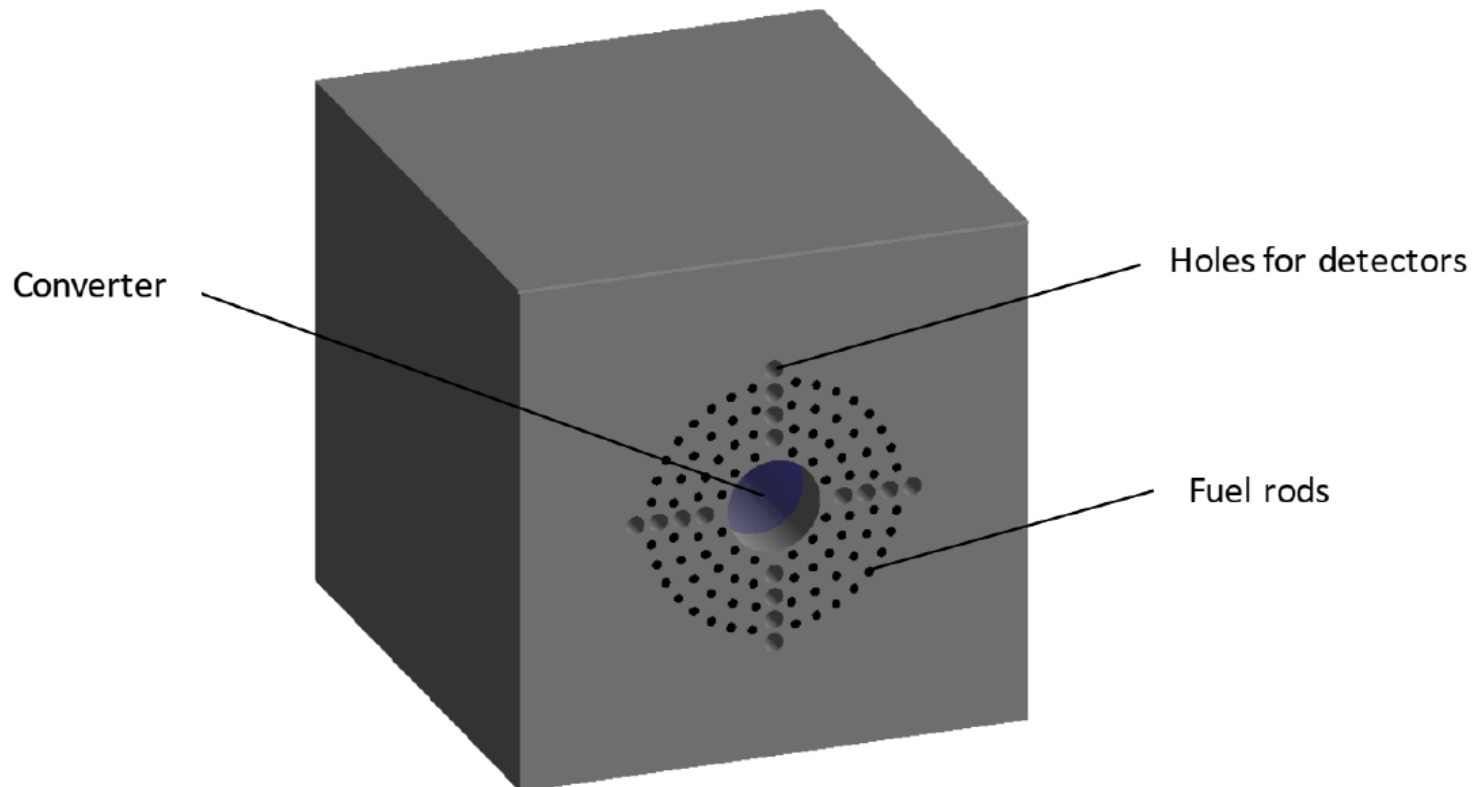
Meier W.R. et al., Fusion technology aspects of laser inertial fusion energy (LIFE), Fusion Engineering and Design 89 (2014) 2489-2492

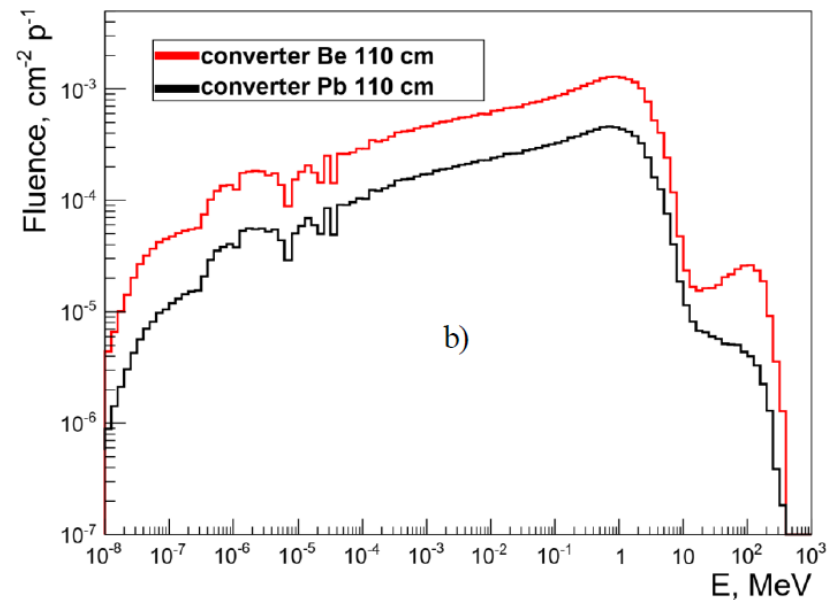
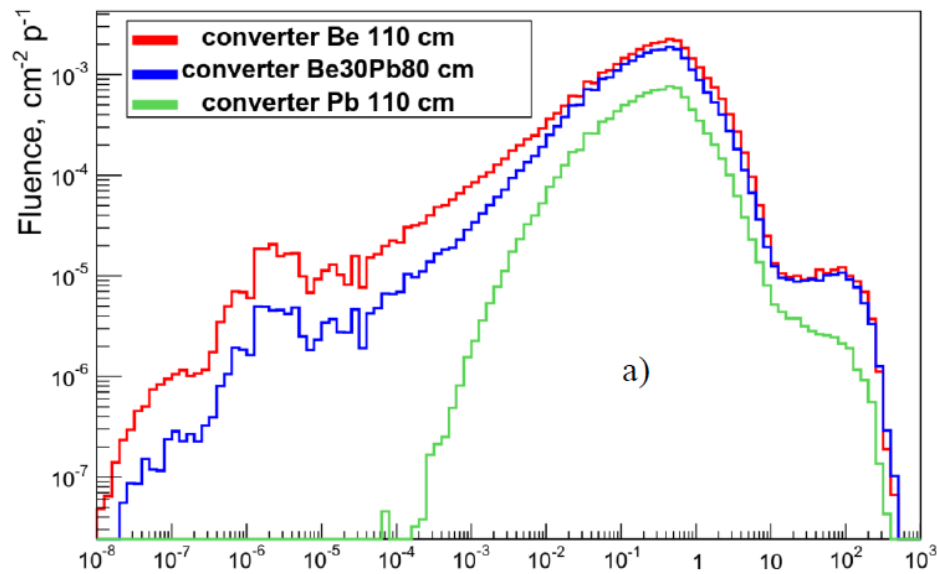
The values of energy gain that could be achieved in ADSR are significantly higher (until 10 times) that the G values estimated for fusion power plant.

Запланированные эксперименты

- Наиболее важные данные об эффективности протонных и ионных пучков получены в экспериментах с топливной подушкой.
- Конструкция экспериментальной мишени должна воспроизводить в малом масштабе ситуацию в реальном ADSR. Это должно позволить также проверить действие преобразователей радиусом 10-20 см и длиной до 110 см.
- Интерес состоит в том, чтобы определить минимальные размеры и минимальное количество топлива, необходимых для корректного воспроизведения соотношения высвобождаемой энергии (количества делений), производимых протонными и ионными пучками.

The design of the graphite target GAMMA-4





Флюенс нейтронов в твэлах, размещенных в мишени из Pb (a) и мишени ГАММА4 (b) с различными конверторами, облученными ^7Li с энергией 0.25 АГэВ.

Выделенная энергия и число делений, полученных в мишени ГАММА4, облученной пучками протонов, ^7Li и ^{20}Ne .

Particle/ Energy, AGeV	Pb110cm		Be20Pb90cm		Be40Pb70cm		Be60Pb50cm		Be110cm	
	$E_{\text{dep}},$ Mev/p	N_f/p	$E_{\text{dep}},$ Mev/p	N_f/p	$E_{\text{dep}},$ Mev/p	N_f/p	$E_{\text{dep}},$ Mev/p	N_f/p	$E_{\text{dep}},$ Mev/p	N_f/p
P1	$6.51 \cdot 10^3$	32.3	$8.5 \cdot 10^3$	43.1	$7.9 \cdot 10^3$	39.7	$7.1 \cdot 10^3$	34.3	$5.5 \cdot 10^3$	26.9
P1.5	$1.07 \cdot 10^4$	53.9	$1.32 \cdot 10^4$	67.1	$1.27 \cdot 10^4$	64.7	$1.09 \cdot 10^4$	54.7	$7.25 \cdot 10^3$	35.3
^7Li 0.25	$4.12 \cdot 10^3$	14.1	$8.53 \cdot 10^4$	39	$8.68 \cdot 10^3$	39.9	$9.1 \cdot 10^3$	41.6	$1.05 \cdot 10^4$	50.3
^7Li 0.3	$5.78 \cdot 10^3$	21.8	$1.13 \cdot 10^4$	53.2	$1.18 \cdot 10^4$	56.4	$1.2 \cdot 10^4$	57.1	$1.37 \cdot 10^4$	66.5
^{20}Ne 1	$6.02 \cdot 10^4$	237.9	$1.3 \cdot 10^5$	636.5	$1.34 \cdot 10^5$	657	$1.2 \cdot 10^5$	582.1	$1.01 \cdot 10^5$	483.9

Выводы

Исследованы условия, обеспечивающие максимальную эффективность ADSR. Основными факторами, связанными с активной зоной и влияющими на эффективность ADSR efficiency являются k_{eff} , материал, используемый для конвертера, и уровень обогащения.

Оптимальное значение k_{eff} находится в пределах 0.985 - 0.988.

Лучшим выбором для конвертера является Ве, особенно для ионных пучков с низкой энергией. Конвертер радиусом 10-20 см и длиной 100-120 см максимизирует энерговыделение и снижает необходимый уровень обогащения, обеспечивая больший период между перегрузками и большее выгорание актинидов. В ADSR за цикл может быть расщеплено до 25 % актинидов, что в 3.5 раза больше, чем в быстром реакторе.

Максимальный прирост энергии протонов получается при 1.5 ГэВ при их ускорении в линейном ускорителе и при меньшей энергии (0.75—1 ГэВ) при использовании циклотрона. В обоих случаях ионные пучки, начиная с ^4He обеспечивают более высокий прирост энергии, чем протоны. С точки зрения P_{net} разница между ускорением в линейном ускорителе или в циклотроне незначительна.

При ускорении частиц в линейном ускорителе при малой длине ускорителя наилучшим вариантом является пучок ^7Li с энергией 0.25 АГэВ. Если необходимо производство высокой энергии, можно ускорить С, О or Ne до 0.75 АГэВ.

В ADSR можно получить высокий выигрыш в энергии от 20 (с пучком ^7Li 0.25 АГэВ) до 45 (с пучком 0.75 АГэВ ^{16}O and ^{20}Ne beam), что делает ADSR эффективным источником энергии.

Графитовая мишень ГАММА-4 (блок размером 110x110x120 см) с 4-мя слоями твэлов с обогащенным ураном и центральным отверстием для размещения разных конвертеров позволяет корректно сравнивать количество делений и выделяемую энергию, реализуемую с протонной и ионной пучки.

Выбранная длина мишени (120 см) позволяет воспроизвести зависимость выделяемой энергии от размеров конвертера Ве для низкоэнергетических ионов.

References

1. Rubbia C. et al., "An Energy Amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator". CERN/AT/93-47, November 1993.
2. Hashemi-Nezhad S.R., Westmeier W., Zamani-Valasiadou M., Thomauske B., Brandt R., Optimal ion beam, target type and size for accelerator driven systems: Implications to the associated accelerator power, Ann. Nucl. En. 38 (2011) 1144–1155
3. Paraipan, M., Javadova. V., Tyutyunnikov S. I., Aspects of target optimization for ADS with light ion beams at energies below 0.5 AGeV, Progress in Nuclear Energy 120 (2020) 103221
4. Paraipan M., Baldin A. A., Baldina E. G., Tyutyunikov S. I., "Light Ion Beams for Energy Production in ADS", EPJ Proceedings MMCP2017, 173 (2018) 04011; Ann. Nucl. En.,110 (2017) p 973.
5. Yu.K. Alexandrov, V.A. Rogov, A.S. Shabalin, "Main features of the BN-800 passive shutdown rods", Proceeding of a Technical Committee meeting held in Obninsk, Russian Federation, 3-7 July 1995, IAEA-TECDOC-884, p. 107-112
6. M. Edelmann, G. Kussmaul, W. Văth, "Development of passive shut-down systems for the european fast reactor EFR", Proceeding of a Technical Committee meeting held in Obninsk, Russia, 3-7 July 1995, IAEA-TECDOC-884, p. 69-79
7. Tohru Suzuki, Xue-Nong Chen, Andrei Rineiski, Werner Maschek, Transient analyses for accelerator driven system PDS-XADS using the extended SIMMER-III code, Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 2594–2611
8. Rui Li, Xue-Nong Chen, Claudia Matzerath Boccaccini, Andrei Rineiski, Werner Maschek, Study on Severe Accident Scenarios: Pin Failure Possibility of MYRRHA-FASTEF Critical Core, Energy Procedia 71 (2015) 14 – 21
9. Lo Fano R., Giovanni P., "Analysis of the effects caused by the core compaction into LRF reactor", 24th International Conference on Nuclear Engineering June 26–30, 2016 Charlotte, North Carolina, USA, <https://doi.org/10.1115/ICONE24-60022>
10. ESS Technical Design Report April 23, 2013 ESS-doc-274
11. [Craddock](#) M. K., Symon K. R., "Cyclotrons and Fixed -Field Alternating-Gradient Accelerators", [Reviews of Accelerator Science and Technology](#), 1(1), pp. 65-97 (2008)

**THANK YOU FOR
ATTENTION !**

The power produced P_{prod} depends on the energy released per projectile E_{dep} , the beam intensity I_{beam} and the conversion coefficient from thermal to electrical power η_{el} :

$$P_{prod} = E_{dep} I_{beam} \eta_{el}$$

The power spent P_{spent} to accelerate a given beam depends on the beam intensity I_{beam} , particle properties (atomic number Z , mass number A , final energy per nucleon E , momentum per nucleon p), and accelerator type. P_{spent} has two components: the power transmitted to the beam P_{beam} , and the power necessary to maintain the functioning of the accelerator P_{acc} .

P_{beam} is given by:

$$P_{beam} = A \cdot E_{dep} I_{beam}$$

P_{acc} depends on the accelerator type.

- in linacs P_{acc} is proportional with the accelerator length and scales with the ratio $A \cdot E/Z$
- in cyclotron P_{acc} is proportional with the area of the accelerator and scales as $(A \cdot p/Z)^2$.

This approach allows to calculate P_{spent} necessary to accelerate a given beam if one knows the accelerator efficiency η_0 for a reference particle with atomic number Z_0 , mass number A_0 and final energy per nucleon E_0 (momentum per nucleon p_0).

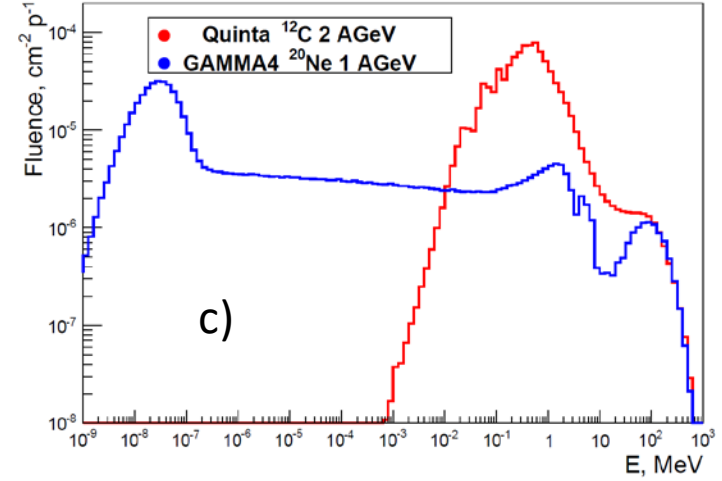
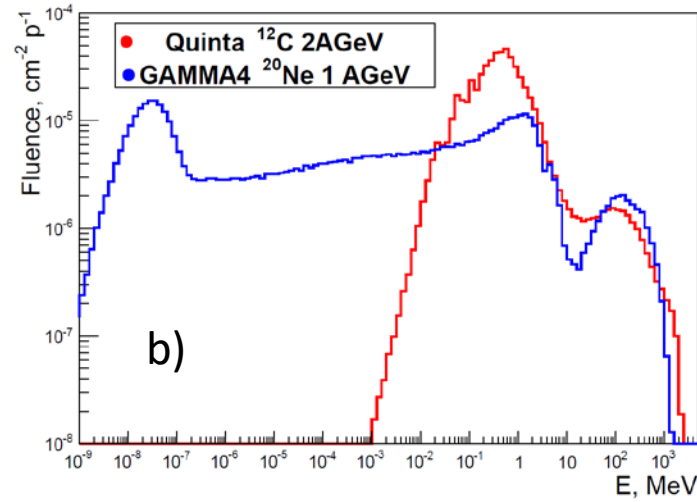
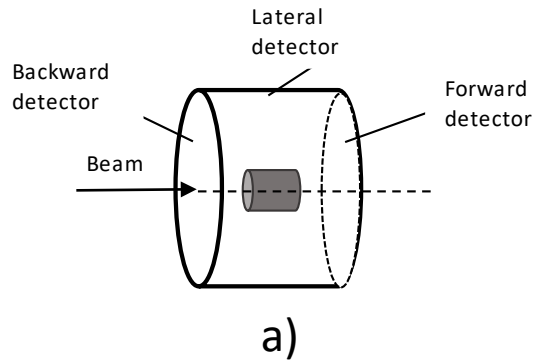
Assuming the same beam intensity one gets in the case of a linac:

$$P_{spent} = A \cdot E \cdot I_{beam} \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right) \frac{Z_0}{Z} \right]$$

and for a cyclotron:

$$P_{spent} = A \cdot E \cdot I_{beam} \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right) \frac{E_0}{E} \frac{A}{A_0} \left(\frac{Z_0}{Z} \frac{p}{p_0} \right)^2 \right]$$

Dose



The set-up used for the simulation of the source term (a), neutron fluence in forward detector (b) and lateral detector (c).

Neutron doses in lateral, backward and forward detectors

Target/Particle	Dlat, Sv/p	Dback, Sv/p	Dforw, Sv/p
Quinta/C 2 AGeV	7.13e-14	4.38e-14	4.96e-14
GAMMA4/Ne 1 AGeV	1.35e-14	2.23e-14	2.94e-14

