Rádiologické environmentálne aspekty urýchľovačov: Môžu to všetko zastaviť?

P. Vojtyla (presenter), M. Battistin, M. Calviani, C. Strabel, H. Vincke

European Organization for Nuclear Research – CERN, Geneva, Switzerland

Urýchľovače: Minulosť, súčasnosť, budúcnosť

- Ako všade, výskum a vývoj robí pokrok
- Príklad: Protónový Synchrotrón v CERNe
  - Od jeho uvedenia do prevádzky sa intenzita zväzku zvýšila o tri rády
- Načo potrebuje fyzika stále výkonnejšie urýchľovače?
  - **Nové hranice, vyššie energie** (125 GeV na nájdenie Higgsovho bozónu)
  - **Vyššie intenzity zväzku**
    - Vysoká štatistická významnosť (objav je deklarovaný iba nad $5\sigma = 10^{-6}$)
    - Sledovanie veľmi vzácnych procesov (neutrínová fyzika, čierna hmota, skryté častice…)
- Kombinácia týchto dvoch zložiek vedie k **vysokým výkonom zväzkov.**

Environmentálne aspekty urýchľovačov (1)

- **Rozptýlené žiarenie** – oslabene hadrónové kaskády a neutrónová “žiara”
  - Prenikavé mióny
  - Elektromagnetické kaskády (fotóny)
  - Neutróny
- Výpuste rádioaktívnych látok do vzduchu
  - Krátko žijúce rádioaktívne plyny, najmä ^{11}C, ^{13}N, $^{14,15}O$, ^{41}Ar (polčasy od 70 s do 1.8 h)
  - Rádioaktívne aerosóly, priamo: ^{7}Be, $^{22,24}Na$, $^{32,33}P$; erózia: ^{54}Mn, ^{60}Co
  - Dlho žijúce rádioaktívne plyny: ^{3}H (HTO, HT), ^{14}C (CO_2, CO), ^{39}Ar
- Výpuste rádioaktívnych látok do vody
  - Krátko žijúce aktivačné produkty kyslíka, ^{11}C, ^{13}N, $^{14,15}O$, a vymyté ^{24}Na ($T_{1/2}$ = 15 h)
  - Dlho žijúce rádionuklidy: HTO, ^{7}Be (aktivácia, vymytie) ^{22}Na (hlavne vymytie)

Environmentálne aspekty urýchľovačov (2)

- **Aktivácia zeminy**: Celá zoologická záhrada rádionuklidov: ^{3}H, cez ^{22}Na, ^{32}P, ^{48}V, ^{60}Co po ^{134}Cs and ^{152,154}Eu
- Aktivácia a kontaminácia spodnej vody
  - Priama aktivácia vody v póroch: HTO
  - Vymývanie: ^{22}Na
  - Účinný "prírodný" filter prepustí iba HTO a ^{22}Na až po miesto odberu:
    - Pomalý tok spodnej vody (1 m/deň – 1 m/rok) kombinovaný s re-absorpciou a pomerne krátky polčas hojne produkovaných rádionuklidov ako ^{7}Be ($T_{1/2}$ = 53.3 d).
- Ak sú použité ťažké materiály s atómovým číslom nad vzácnymi zeminami, dlho žijúce alfa rádionuklidy zo skupiny vzácnych zemín (napr. ^{148}Gd) môžu byt vyprodukovane a rozptýlené:
    - Rádiotoxické a ťažko merateľné
    - Populárne materiály na tienenie a na terče W, Pb, U (napr. neutrónové zdroje).

Čo máme teraz? (1)

Ohraničenie zákonom

- Ročná efektívna dávka osobám z verejnosti od všetkých prevádzkovateľov < 1 mSv
- Smerná hodnota od všetkých urýchľovačov: < 0.3 mSv (1/3 pravidlo)
  - Rozptýlené žiarenie: < 0.1 mSv
  - Rádioaktívne látky vo výpustiach do vzduchu: < 0.1 mSv
  - Rádioaktívne látky vo výpustiach do vody: < 0.1 mSv
- Princíp ALARA
  - Expozícia musí byť odôvodnená.
  - Dávka musí byť ohraničená, inak nebude prevádzka povolená.
  - Zariadenie musí byť optimalizované, inak to budú úrady požadovať.
- V CERNe považujeme optimalizáciu za dosiahnutú ak žiadna osoba z verejnosti nedostane dávku **> 0.01 mSv/rok.**

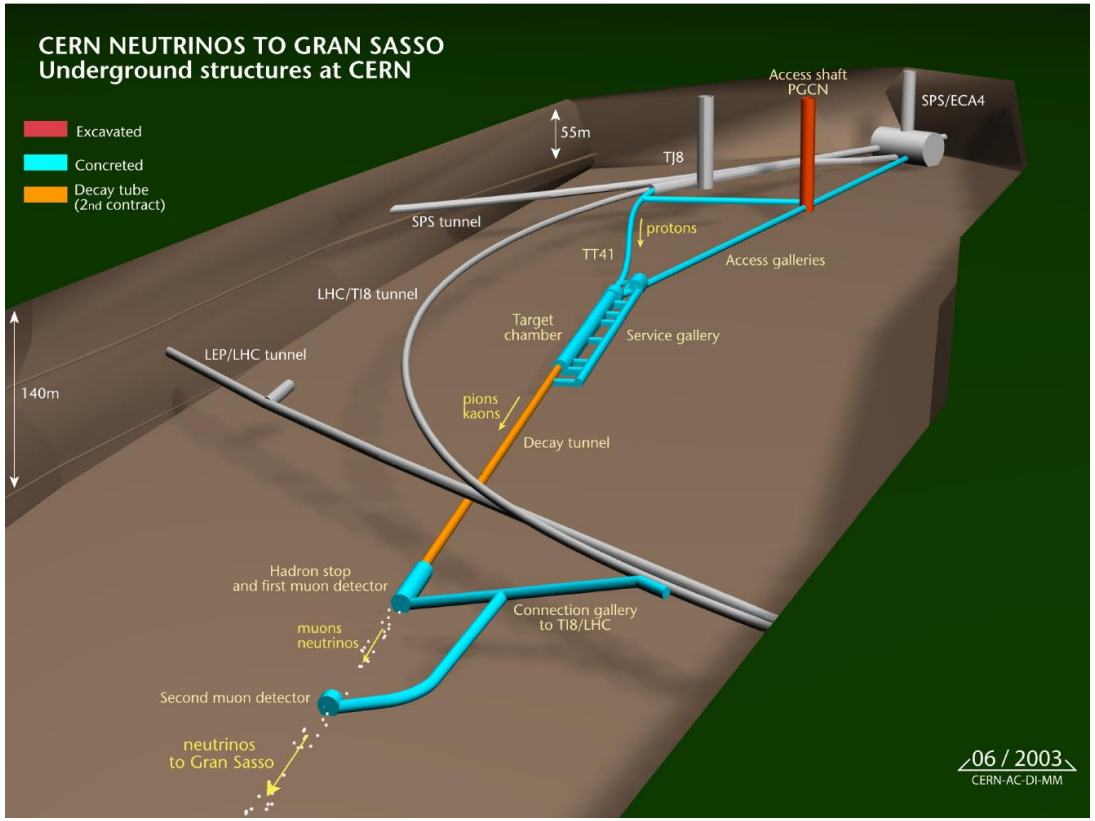
Čo máme teraz? (2)

Príklady výpustí krátko žijúcich rádioaktívnych plynov

ak by sa nezaviedli žiadne zmierňujúce opatrenia

- Empirický vzorec pre vyprodukovanú aktivitu Q [Bq]:
- $Q \approx N_{\mathrm{p}} \times 4.6 \times 10^{-7} \times p^{0.85}$
  - N_{p} = počet protónov interagujúcich za rok
  - p = ich hybnosť v GeV·c^{-1}
  - Je to založené na simuláciách programom FLUKA
  - Pozor: Je to iba potenciál produkcie rádioaktivity!
- Konzervatívny dávkový koeficient: $e_{\mathrm{g}} = 1 \times 10^{-18}$ Sv·Bq^{-1}
  - Najväčší koeficient z praxe, ktorý bol zaokrúhlený smerom hore
- Efektívna dávka $E = Q \times e_{\mathrm{g}}$

Čo máme teraz?
CNGS – ultimatívna intenzita

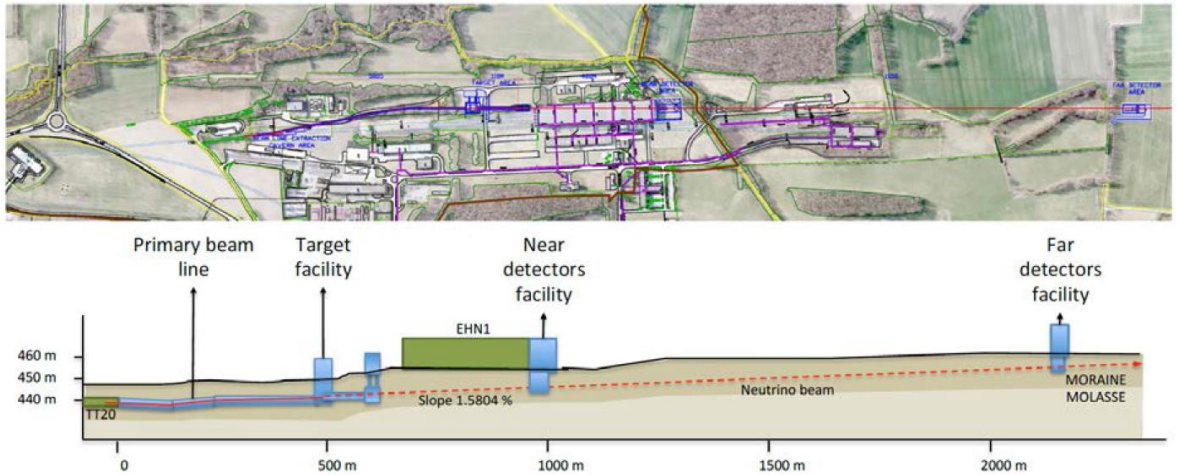


Courtesy of the CNGS collaboration

- $N_p = 7.6 \times 10^{19}$
- $p = 400\ \mathrm{GeV \cdot c^{-1}}$
- $T_{\mathrm{operation}} = 260$ d
- $P = 220$ kW
- $Q \approx 6$ PBq

- Potenciálna $E \approx 6$ mSv
- Skutočná $E < 0.0006$ mSv

Čo je plánované teraz?
CENF – CERN Neutrino Facility

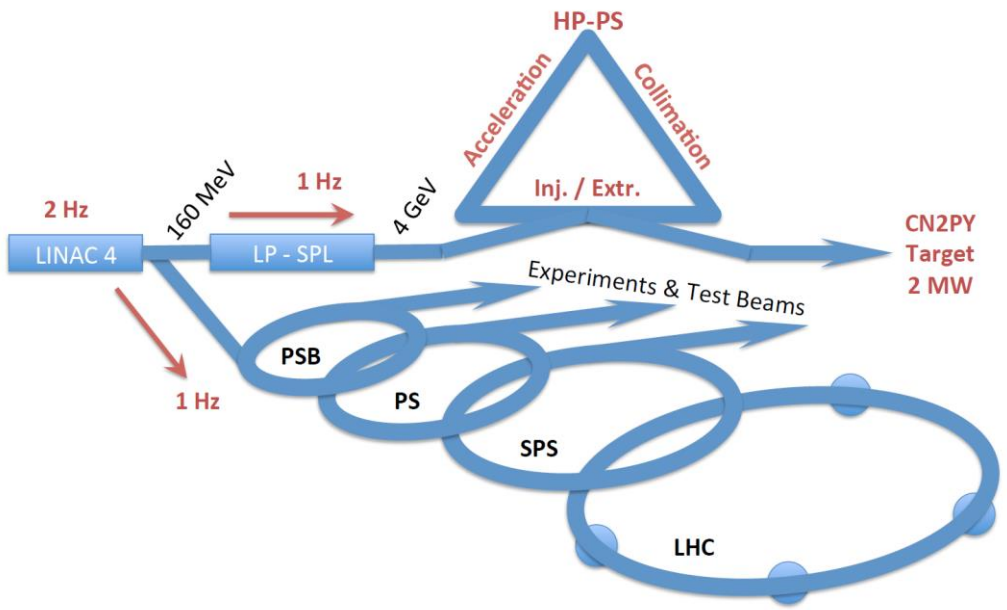


Courtesy of the CENF collaboration

- $N_p = 1.9 \times 10^{20}$
- $p = 100\ \mathrm{GeV \cdot c^{-1}}$
- $T_{\mathrm{operation}} = 180$ d
- $P = 200$ kW
- $Q \approx 4$ PBq

- Potenciálna $E \approx 4$ mSv
- Vypočítaná $E < 0.0002$ mSv

Čo je plánované teraz? LAGUNA-LBNO

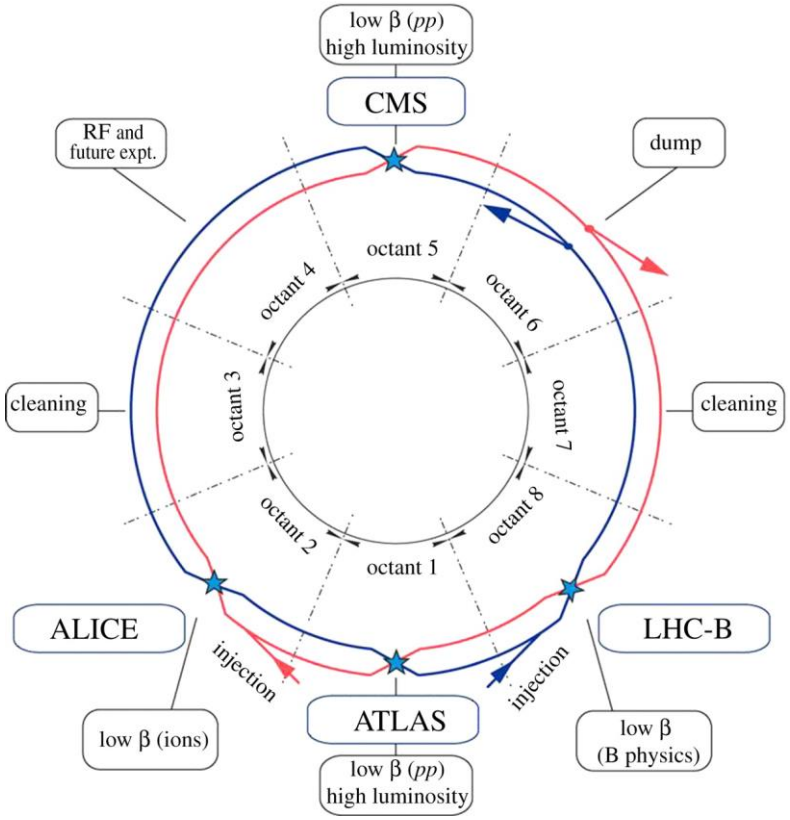


- $N_p = 2.6 \times 10^{21}$
- $p = 75\ \mathrm{GeV \cdot c^{-1}}$
- $T_{\mathrm{operation}} = 180$ d
- $P = 2'000$ kW
- $Q \approx 50$ PBq

- Potenciálna $E \approx 50$ mSv
- Odhadnutá $E < 0.001$ mSv

Courtesy of the LAGUNA-LBNO collaboration

Čo je plánované teraz?
HL LHC (collider)



Courtesy of CERN

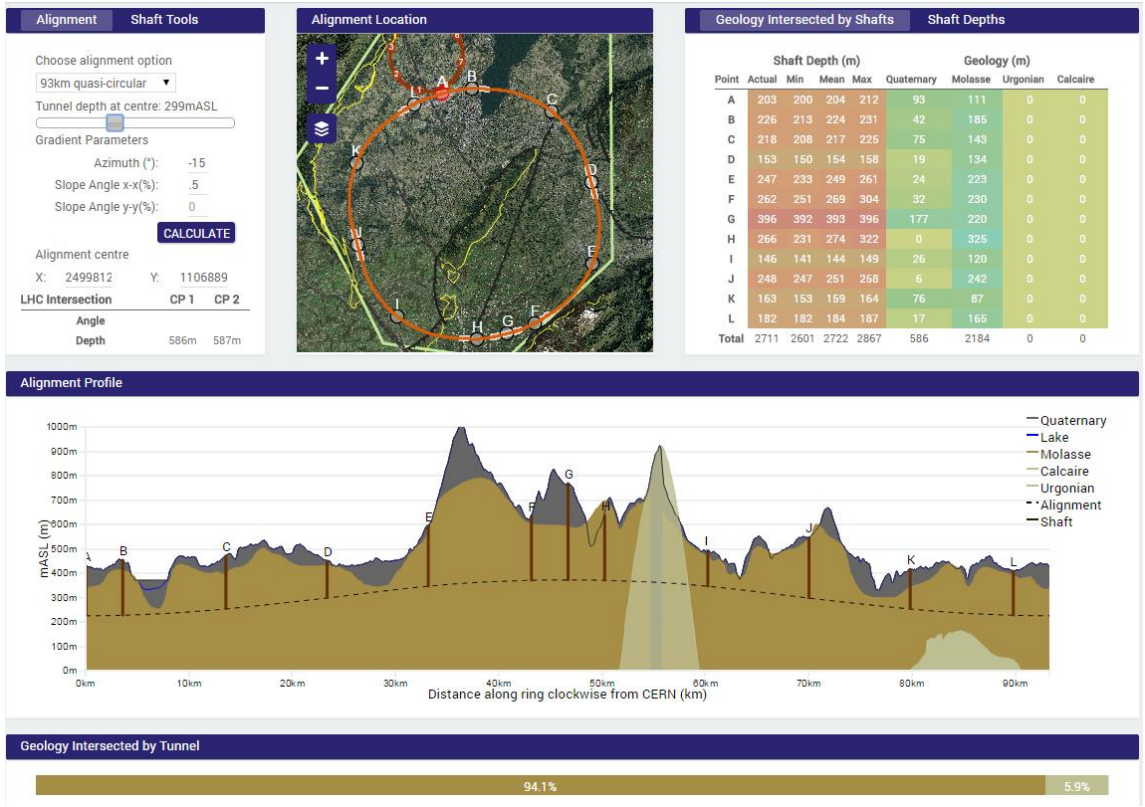
- Obvod: 27 km
- p = 7'000 GeV·c^{-1}
- E_{beam} = 530 MJ
- $T_{operation}$ = 160 d
- N_p (kolimátor) = 3.7 × 10^{16}
- Q (kolimátor) ≈ 30 TBq

- Potenciálna E (kolimátor) ≈ 0.03 mSv
- Vypočítaná E = 0.008 mSv

- N_p (dump) = 8.2 × 10^{16}
- Q (dump) ≈ 100 TBq

- Potenciálna E (dump) ≈ 0.07 mSv
- Vypočítaná E (dump) – zanedb.

Čo nás čaká?
Future Circular Collider (FCC-hh)



Courtesy of CERN

- Obvod: 100 km
- p = 50’000 GeV·c^{-1}
- E_{beam} = 8’400 MJ
- $T_{\text{operation}}$ = 160 d
- N_{p} (kolimátor) ≈ 8 × 10^{16}
- N_{p} (dump) ≈ 1.8 × 10^{17}
- Q (kolimátor) ≈ 400 TBq
- Q (dump) ≈ 1’000 TBq
- Potenciálna E (kolimátor) ≈ 0.4 mSv
- Potenciálna E (dump) ≈ 0.8 mSv
- **Skutočná E bude podstatne nižšia**

Len kľud!

- Uvedené príklady ukazujú, že urýchľovače nie sú sterilné čo sa týka ich potenciálneho rádiologického vplyvu na životné prostredie.

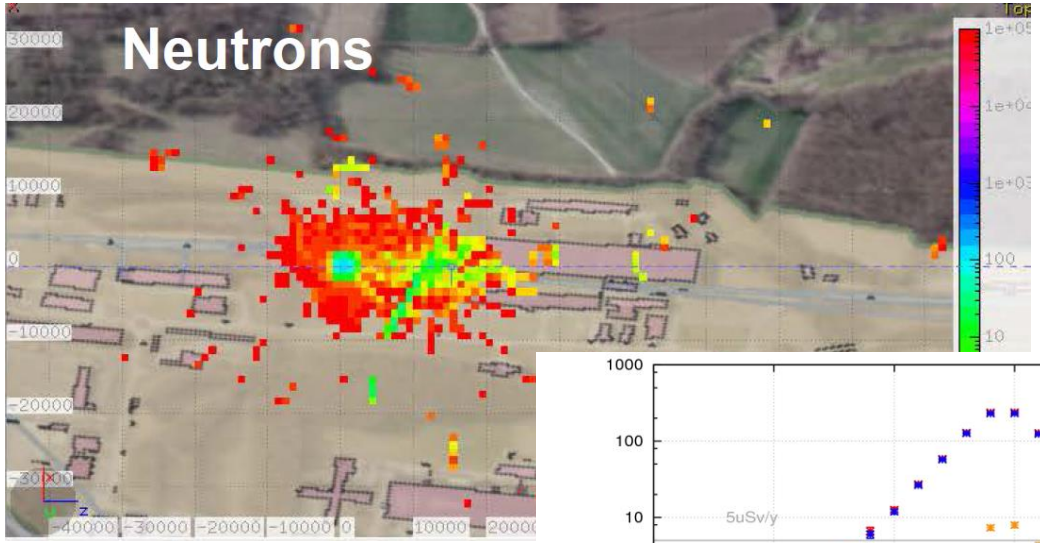
- Potenciálne efektívne dávky majú najhoršie možné hodnoty ak by sa neprijali žiadne zmierňujúce opatrenia. V skutočnosti dosahujeme úrovne expozície, ktoré sú rádovo nižšie.

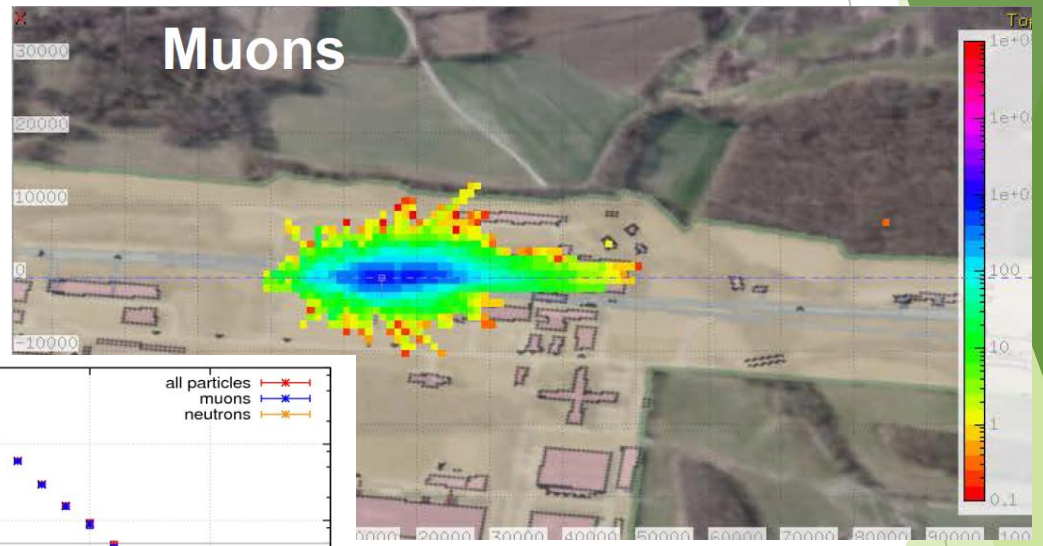
- **Expert na radiačnú ochranu musí byť v tíme už pri zrode projektu.**

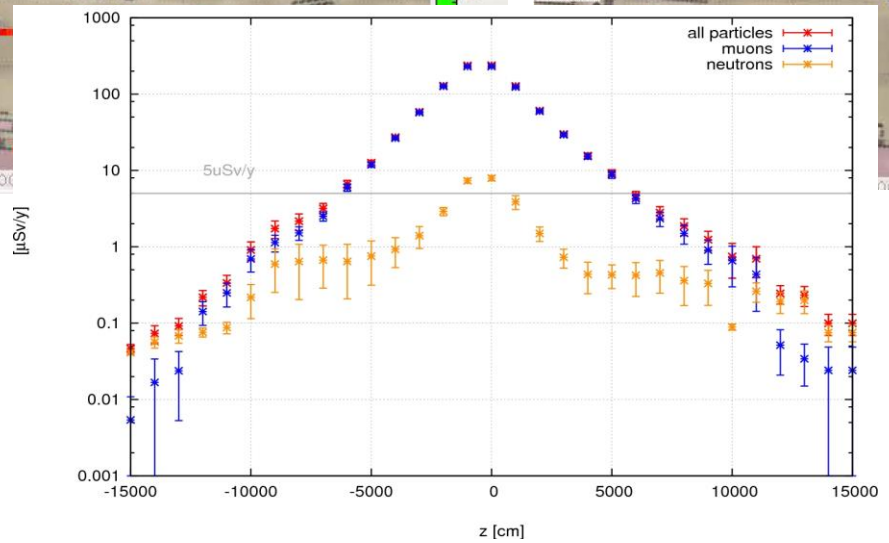
Zmierňujúce opatrenia – Žiarenie (1)

- Je treba účinné tienenie a jeho návrh je iteratívny proces kombinujúci skúsenosť s Monte Carlo simuláciami.
- Štruktúra cibuľových šupiek:
  - Ťažké materiály (kovové bloky). Liata oceľ s nízkym obsahom kobaltu je populárna (^{60}Co!).
  - Betónová obálka na absorpciu neutrónov
  - Niekedy dokonca mramor okolo najhorúcejších častí
- Cikcakovité prístupové šachty na absorpciu neutrónov
- Mióny: Dlhý dobeh (≈km) ➔ Ohnúť zväzok a namieriť ho do zeme
- Hlboko pod zemou (LHC: 75–150 m; FCC: 200–400 m) – účinné na mióny
  - N.B. Má to aj iné dôvody: Zavadzajú pozemné štruktúry, stabilná geologická štruktúra …
- Kvôli nízkym dávkovým limitom v životnom prostredí sa bežia náročné Monte Carlo simulácie v ŽP až keď je návrh tienenia dokončený.

Zmierňujúce opatrenia – Žiarenie (2)
Príklad - CENF



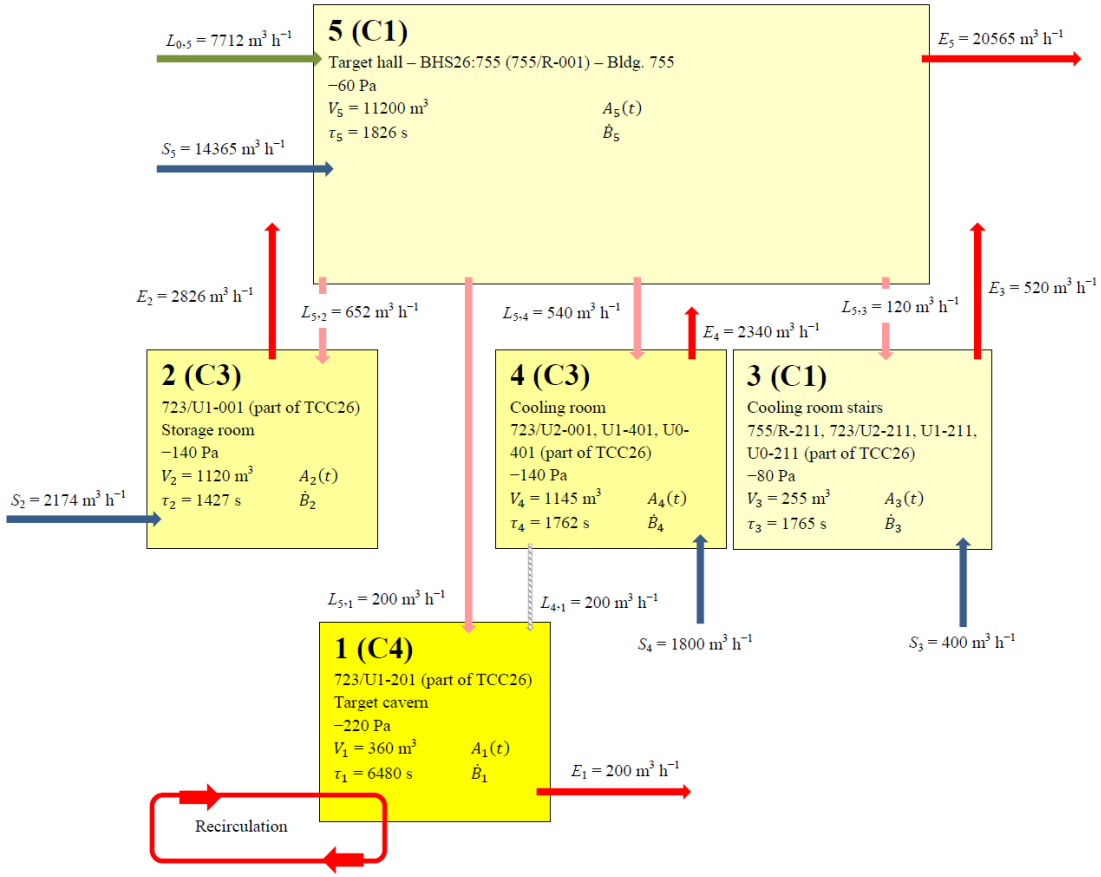




Zmieňujúce opatrenia – Ventilácia

- Aerosóly – veľmi účinné filtre (pomerne ľahko dosiahnuteľné)
- Krátko žijúce rádioaktívne plyny a prchavé látky: Nechať ich rozpadnúť.
  - Tak málo vzduchu okolo “horúcich” častí ako je len možné (obmedzenie zdroja)
  - Dlhé tunely a ventilačné potrubia (napr. CNGS, LHC)
  - Čiastočne uzavreté ventilačné systémy v kaskádach (CNGS, CENF, LAGUNA, SHIP)
- Dlho žijúce rádioaktívne plyny (HTO, ^{14}C, ^{39}Ar)
  - Použitie hélia v uzavretých priestoroch, pretože iba ^{3}H sa môže produkovať z He.
  - 100% čisté He sa nedá dosiahnuť, ale 0.1% je ľahko dosiahnuteľné.
  - Závisí na urýchľovači aké čisté He je treba použiť.

Zmierňujúce opatrenia – Ventilácia
Príklad z CENF – teória



$$\frac{\mathrm{d}A_1(t)}{\mathrm{d}t} = \dot{B}_1 - \left(\lambda + \frac{E_1}{V_1}\right) A_1(t) + \frac{L_{5,1}}{V_5} A_5(t)$$

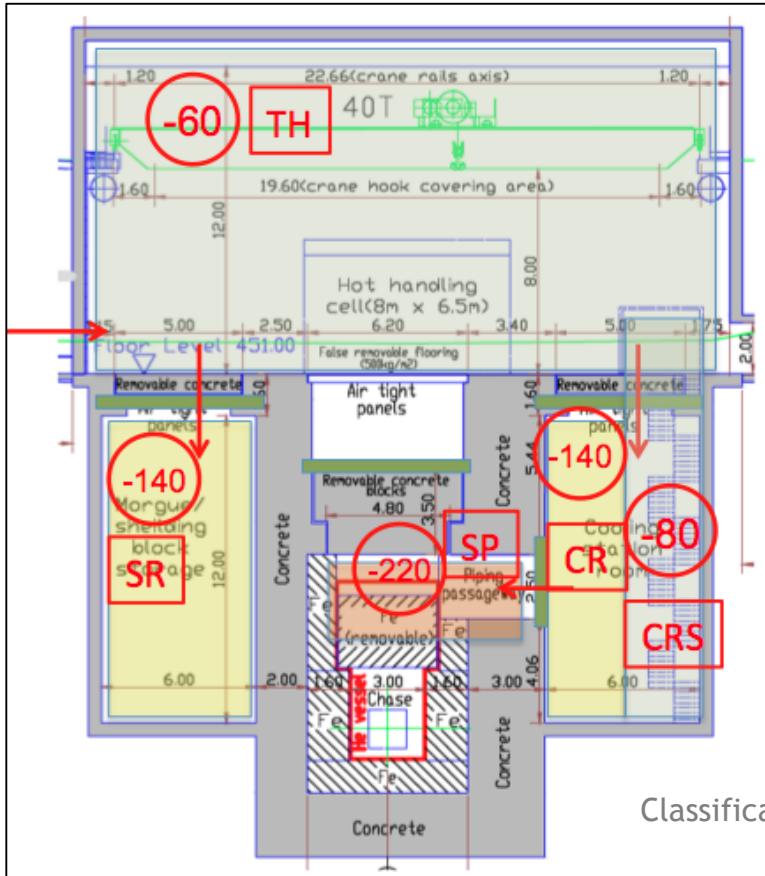
$$\frac{\mathrm{d}A_2(t)}{\mathrm{d}t} = \dot{B}_2 - \left(\lambda + \frac{E_2}{V_2}\right) A_2(t) + \frac{L_{5,2}}{V_5} A_5(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}A_3(t)}{\mathrm{d}t} = \dot{B}_3 - \left(\lambda + \frac{E_3}{V_3}\right) A_3(t) + \frac{L_{5,3}}{V_5} A_5(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}A_4(t)}{\mathrm{d}t} = \dot{B}_4 - \left(\lambda + \frac{E_4}{V_4}\right) A_4(t) + \frac{L_{5,4}}{V_5} A_5(t)$$

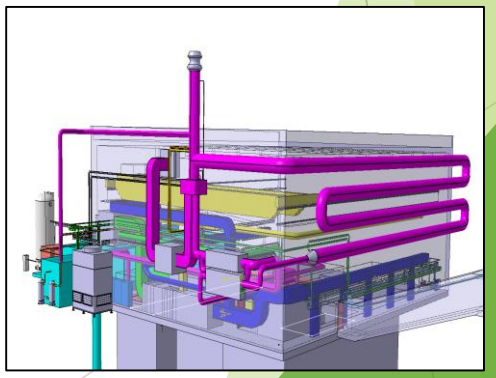
$$\frac{\mathrm{d}A_5(t)}{\mathrm{d}t} = \dot{B}_5 - \left[\lambda + \frac{1}{V_5}\left(E_5 + \sum_{i=1}^{4} L_{5,i}\right)\right] A_5(t)$$

Zmierňujúce opatrenia- Ventilácia
Príklad z CENF - Inžinierske riešenie



Room	Classification ISO 17873	Volume exchange (h^{-1})	Pressure (Pa)
TH	C1	1	-60
CRS	C1	2	-80
CR	C3	2	-140
SR	C3	2	-140
SP	C4	5	-220

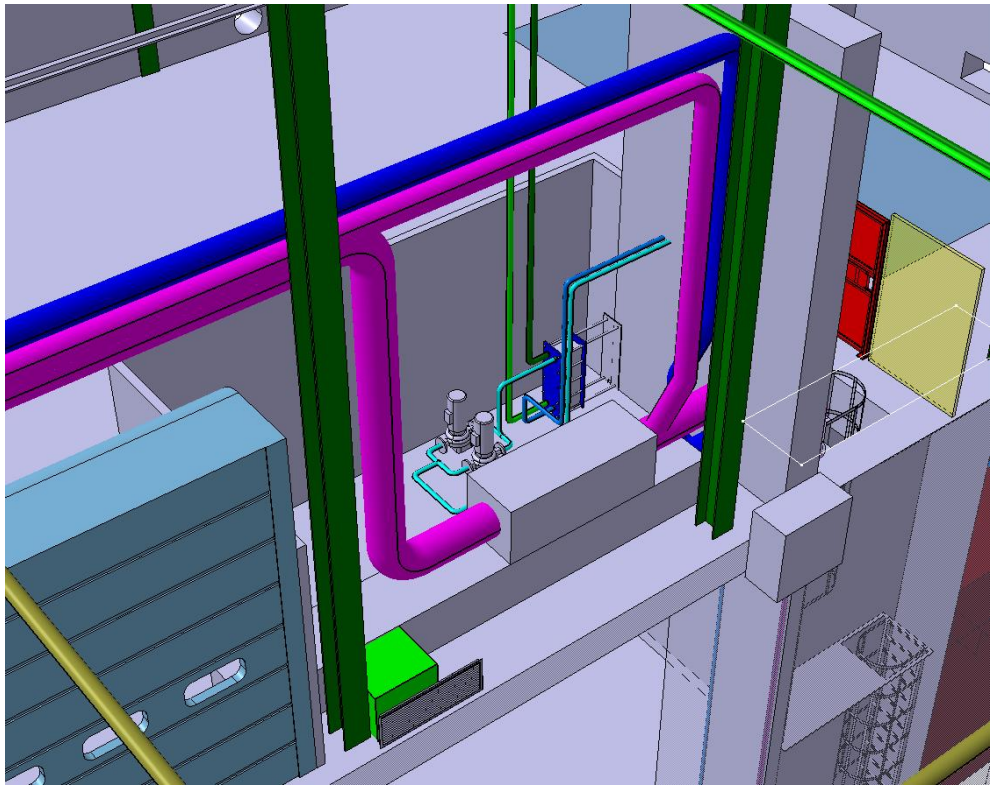
Classification and pressure cascade of the CENF rooms



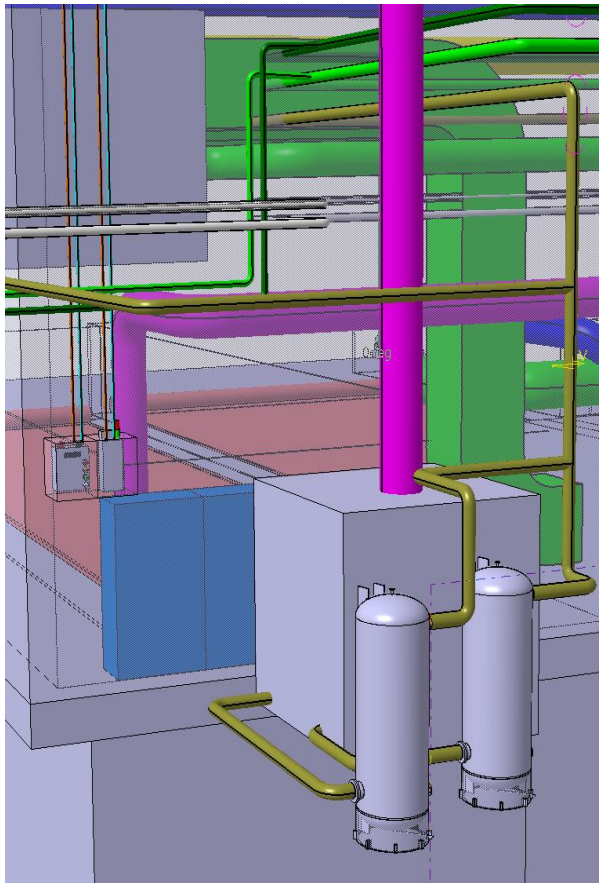
Zmierňujúce opatrenia – vypúšťaná voda

- Krátko žijúce produkty z kyslíka ^{11}C, ^{13}N, $^{14,15}O$: Nech sa rozpadnú v záchytných bazénoch alebo v potrubiach ($T_{1/2,max}$ = 20 min).
- Dlho žijúce (^{7}Be, $^{24,22}Na$, ^{54}Mn, $^{58,60}Co$,…):
  - V primárnych chladiacich okruhoch – zachytiť iónovými výmenníkmi (živica)
  - V otvorených okruhoch a presakovanie: Odpariť; so zvyškom sa potom narába ako s rádioaktívnym odpadom.
- HTO:
  - Špecifická aktivita môže dosiahnuť stovky kBq/L.
  - Rádiologicky nie je trícium dôležité, ale dá sa ľahko merať vo vode (DL niekoľko Bq/L), je to skôr problém verejných vzťahov ako radiačnej ochrany.
  - Rozptýlenie vyparenej vody vo vzduchu sa uprednostňuje, hoci rádiologický dopad vypustenia do rieky je porovnateľný.

Zmierňujúce opatrenia – Vypúšťaná voda Príklad z CENF



Primary water cooling system

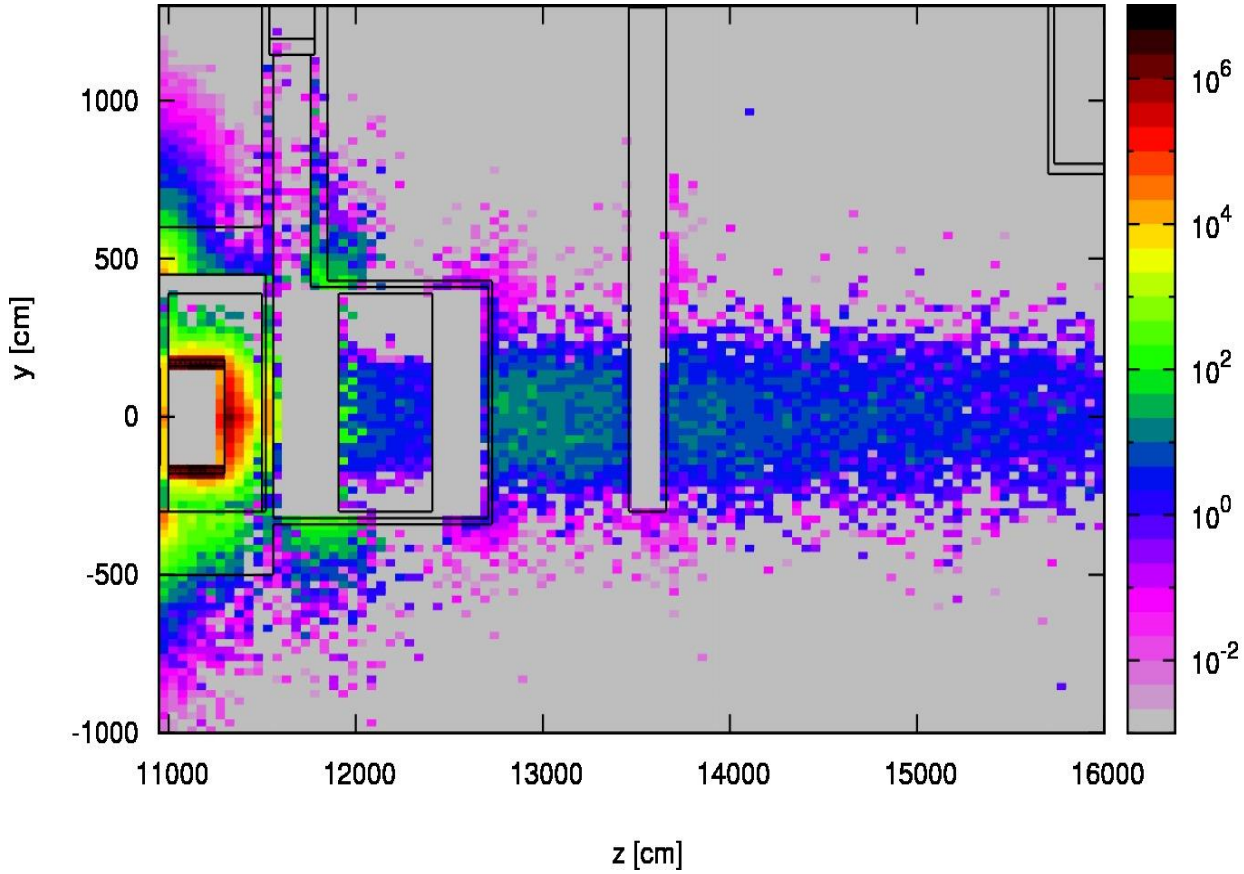


Rising water collection tanks and a water evaporator

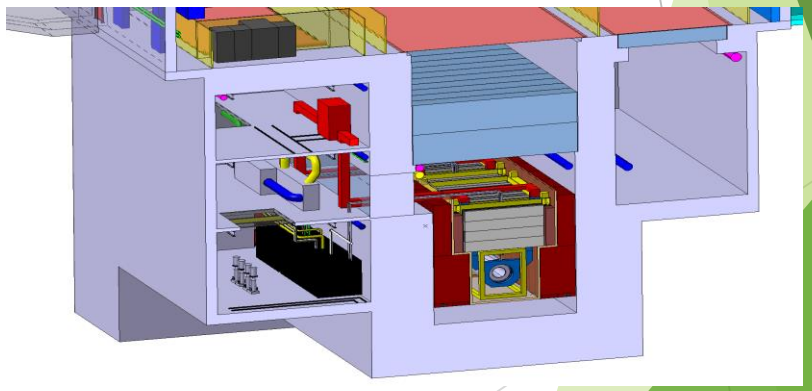
Zmierňujúce opatrenia – Aktivácia zeminy

- Vnútorné tienenie okolo “horúcich” častí z kovových blokov, ktoré môžu byť znova použité alebo spracované ako rádioaktívny odpad.
- Vonkajšie tienenie z betónových blokov, ktoré môžu byť znova použité alebo spracované ako rádioaktívny odpad.
- Zostatkové úrovne rádioaktivity musia byť pod limitmi na uvoľnenie materiálov zo systému radiačnej ochrany.
- Potrebná hrúbka týchto vrstiev môže byť závažným problémom ak je technicky nemožné nimi manipulovať.
- Najúčinnejšie riešenie: Umiestniť urýchľovač hlboko pod zemou v nepriepustnej geologickej vrstve ako v molase okolo LHC.

Zmierňujúce opatrenia – Aktivácia pôdy
Príklad z CENF



Mapa koncentrácie aktivity ^{22}Na nahromadeného v zemine okolo dumpu zväzku na konci päťročnej prevádzkovej doby



Modulárna štruktúra tieniacich blokov

Zmierňujúce opatrenia – Podzemná voda

- V praxi si zaslúži pozornosť iba pár rádionuklidov: ^{3}H, ^{22}Na, ^{54}Mn and ^{45}Ca (čistý beta žiarič).
- Podľa literatúry všetko trícium sa môže vymyť z aktivovanej zeminy zatiaľ čo vymyteľná časť ^{22}Na z väčšiny typov zeminy je okolo 10%; v extrémnych prípadoch nanajvýš 20%.
- Najlepšie zmierňujúce opatrenie je zamedziť umiestneniu urýchľovačov v geologických štruktúrach, ktoré obsahujú zásoby pitnej vody.
- Obvykle sa zvažujú dve možnosti:
  - Obmedziť priesak vody do “horúcich” častí urýchľovača (napr. geo-membrány)
  - Znehybniť produkty aktivácie v betóne prekrývajúcom zóny aktivácie pre ktoré by vymytá voda prekročila limity.
- **Toto je najťažší problém ochrany životného prostredia.**

Zhrnutie

- Vysoko výkonné urýchľovače už nie sú sterilné čo sa týka ich vplyvu na životné prostredie.
- Riziko spojené s ich prevádzkou je podstatne menšie ako u jadrových elektrární, ale ich dopad sa ťažko zmierňuje kvôli dlhému dobehu priameho žiarenia a účinnosti aktivácie materiálov (napr. dobeh miónov v zemine je niekoľko km).
- Máme mnoho riešení, ale odborníci na radiačnú ochranu musia byť v projekte už od začiatku. Len takto sa da predísť nepríjemným prekvapeniam.
- Najlepšie riešenie je umiestniť takéto zariadenie hlboko pod zemou, v stabilnej geologickej vrstve nepriepustnej pre spodnú vodu. Avšak vplyv tretích strán nemôže byt vylúčený ani v tomto prípade, napr. geotermálna energia.
- Rádiologické environmentálne aspekty: Môžu nám pokaziť radosť? **Áno, môžu!** Ale nie je to veľmi pravdepodobné ak sa do toho zapojí ľudská vynaliezavosť.
- **Mladí výskumníci, pridajte sa! Je tu stále veľa na vyriešenie.**